

Universidad Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE TRANSFORMADORES CON TOMAS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

Autor: Rocío Camacho Aylagas

Tutor: Miguel Eduardo Montilla D'Jesus

Leganés, Septiembre 2015

Agradecimientos.

En primer lugar agradezco a mis padres todo el esfuerzo que han hecho y el apoyo que me han dado en todo este tiempo. Posiblemente sin su ayuda no habría conseguido llegar hasta aquí. Gracias a ellos he podido salir adelante cuando no tenía fuerzas.

También agradezco a mi hermana Marina y a Alberto por su paciencia, a mis compañeros de clase y amigos de toda la vida que han estado siempre ahí, tanto en los buenos momentos como en los malos y nunca han dejado de apoyarme.

A mi tutor Miguel, por toda la ayuda prestada sin importar horarios ni vacaciones.

RESUMEN.

El siguiente proyecto se centra en el análisis de los llamados transformadores reguladores. Se basa en la inclusión de un determinado tipo de transformador regulador en un sistema dado, y el posterior análisis del comportamiento de dicha máquina eléctrica. La simulación de los transformadores reguladores y del sistema eléctrico en estudio se llevará a cabo con el software Matlab®.

En este proyecto se presenta en primer lugar una breve introducción teórica sobre determinados conceptos necesarios para entender el posterior análisis que se va a realizar con el transformador regulador. Estos conceptos incluyen el entendimiento del llamado flujo de potencia, su método de resolución (Newton-Raphson) y el concepto de la estabilidad de tensión de un determinado sistema. También se introducirán los transformadores reguladores y sus tipos así como su función dentro de un sistema.

Una vez expuestos dichos conceptos, se pasará a mostrar en el programa Matlab® los algoritmos necesarios para representar el comportamiento del sistema con la inclusión de dichos transformadores. El primer algoritmo no tendrá ningún tipo de transformador regulador, el segundo presentará un transformador conocido como LTC y el último incluirá un transformador de tipo PS.

Por último, se realizará el análisis de estabilidad de tensión mencionado anteriormente con el que se comparará la variación de los resultados ante la inclusión de dicho transformador regulador. Se realizarán las llamadas gráficas de nariz o PV para analizar dicha estabilidad de tensión, también con el software Matlab®.

ABSTRACT.

The following project focuses on the analysis of the named regulating transformers. It is based on the inclusion of a particular type of regulating transformer in an electric system and the analysis of the behavior of this electrical machine. The simulation of the regulating transformers and the electric system will be carried with Matlab © software.

First, this project presents a brief theoretical introduction on certain concepts that are necessary to understand the later analysis that will be performed with the regulating transformer. These concepts include the named power flow, its resolution method (Newton-Raphson) and the concept of voltage stability of a given system. Regulating transformers types and their function within a system will also be introduced.

Once exposed these concepts, it will shown in Matlab© software the needed algorithms to represent the behavior of the electric system with the inclusion of such transformers. The first algorithm will not have any type of regulating transformer, the second one will include a regulating transformer known as LTC and the last algorithm will have a transformer PS type.

Finally, the analysis of voltage stability mentioned above and a comparison of the variation of results with the inclusion of the regulating transformer will be made. The graphics called PV or Nose curves will be made to analyze this voltage stability, also with the Matlab© software.

ÍNDICE GENERAL.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.2.1 Objetivos generales.....	11
1.2.2 Objetivos específicos.....	11
1.3 ANTECEDENTES.....	11
2. FLUJO DE POTENCIA.....	13
2.1 INTRODUCCIÓN.....	13
2.2 CONCEPTOS BÁSICOS.....	14
2.2.1 Red eléctrica.....	14
2.2.2 Valores en por unidad.....	16
2.2.3 Parámetros de las líneas de transmisión	16
2.2.4 Clasificación de los nudos.....	19
2.2.5 Construcción de la matriz de admitancias.....	20
2.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA FLUJO DE POTENCIA.....	23
2.3.1 Método Newton-Raphson.....	23
2.3.2 Newton-Raphson aplicado a flujo de potencia.....	25
3. ESTABILIDAD DE TENSIÓN.....	30
3.1 ESTABILIDAD DE UN SISTEMA.....	30
3.2 ESTABILIDAD DE TENSIÓN.....	31
3.2.1 Componentes del sistema que influyen en la tensión.....	33
3.2.2 Control de potencia reactiva y de tensión.....	34
3.2.3 Colapso de tensión.....	35
4. TRANSFORMADORES REGULADORES.....	36
4.1 TRANSFORMADOR REGULADOR DE MÓDULO.....	37
4.1.1 Ecuaciones para el modelado de LTC.....	38

4.1.2 Newton-Raphson aplicado a flujo de potencia con LTC.....	39
4.2 TRANSFORMADOR DE REGULACIÓN DE ÁNGULO.....	42
4.2.1 Ecuaciones para el modelado de PS.....	43
4.2.2 Newton-Raphson aplicado a flujo de potencia con PS.....	44
5. CASOS DE ESTUDIO.....	48
5.1 FLUJO DE POTENCIA SIN TRANSFORMADOR REGULADOR.....	48
5.1.1 Datos del sistema a analizar.....	48
5.1.2 Diagrama de flujo.....	50
5.1.3 Algoritmo en Matlab®.....	51
5.1.4 Soluciones del sistema. Caso base.....	55
5.2 FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR LTC.....	57
5.2.1 Datos del transformador LTC.....	57
5.2.2 Diagrama de flujo. LTC.....	58
5.2.3 Algoritmo en Matlab®. LTC.....	59
5.2.4 Soluciones del sistema. Caso base: LTC.....	64
5.3 FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR PS.....	66
5.3.1 Datos del transformador PS.....	67
5.3.2 Diagrama de flujo. PS.....	68
5.3.3 Algoritmo en Matlab. PS.....	69
5.3.4 Soluciones del sistema. Caso 1: PS.....	72
5.3.5 Soluciones del sistema. Caso 2: PS.....	75
5.3.6 Límites de operación del PS.....	78
6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN.....	79
6.1 ANÁLISIS SIN TRANSFORMADOR REGULADOR.....	80
6.1.1 Nudo 5.....	80
6.1.2 Nudo 6.....	84
6.1.3 Nudo 8.....	87
6.2 ANÁLISIS CON TRANSFORMADOR REGULADOR LTC.....	90
6.2.1 Nudo 5.....	90
6.2.2 Nudo 6.....	96
6.2.3 Nudo 8.....	98
6.2.4 Análisis caso base.....	102

7. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS.....	105
8. PLANIFICACIÓN.....	106
9. BIBLIOGRAFÍA.....	107
9. ANEXOS.....	108
ANEXO I. ALGORITMO DE FLUJO DE POTENCIA SIN TRANSFORMADOR REGULADOR.....	108
ANEXO II. ALGORITMO DE FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR REGULADOR DE MÓDULO DE LA TENSIÓN O LTC.....	123
ANEXO III. ALGORITMO DE FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR REGULADOR DE ÁNGULO DE TENSIÓN O PS.....	146
ANEXO IV. ALGORITMO PARA REPRESENTAR LAS CURVAS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN (CURVAS PV O NARIZ).....	166
ANEXO V. ALGORITMO PARA REPRESENTAR LA TOMA DEL TRANSFORMADOR LTC CON RESPECTO A LA POTENCIA ACTIVA.....	171

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1. Ejemplo de línea de transporte trifásica de la red eléctrica. <i>Fuente:</i> [4].....	15
Figura 1.2. Distribución de los parámetros en una línea eléctrica de transmisión.....	17
Figura 2.2. Representación modelo línea corta.....	18
Figura 2.3 Representación modelo línea mediana. Modelo en π	19
Figura 2.4 Representación modelo línea larga.....	19
Figura 2.6. Ejemplo sistema para la construcción de la matriz de admitancias. <i>Fuente:</i> [7]....	21
Figura 2.7. Ejemplo para la construcción de la matriz de admitancias en análisis nodal. <i>Fuente:</i> [7].....	21
Figura 2.8. Línea transmisión con impedancia equivalente de un nudo k a un nudo m	27
Figura 3.1. Clasificación de estabilidad de los sistemas de potencia. <i>Fuente:</i> [10].....	30
Figura 3.2. Curva de Nariz o curva PV para distintos factores de potencia inductivos o capacitivos. <i>Fuente:</i> [11].....	31
Figura 4.1. Ejemplo transformador de potencia. <i>Fuente:</i> [12].....	36
Figura 4.2 Transformador regulador para el control del módulo de la tensión. [14].....	38
Figura 4.3 Circuito transformador de tomas variables con dos devanados. <i>Fuente</i> [6].....	38
Figura 4.4 Transformador regulador para el control de la fase de la tensión.[14].....	43
Figura 4.5. Circuito monofásico del transformador con regulación de ángulo de tensión. <i>Fuente:</i> [15].....	43
Figura 5.1 Ejemplo de sistema de 9 nudos y 3 generadores con 3 cargas para el análisis. <i>Fuente:</i> [16].....	49
Figura 5.2. Diagrama de flujo del algoritmo del flujo de potencia sin regulador.....	50
Figura 5.3. Representación del flujo de potencia por el sistema estudiado.....	56
Figura 5.4. Sistema a estudiar con la inclusión del transformador regulador del módulo de la tensión que controla el nudo 5.....	57
Figura 5.5. Diagrama de flujo del algoritmo del flujo de potencias del sistema con un transformador regulador LTC.....	58
Figura 5.6. Representación del flujo de potencias por el sistema estudiado al incluir un transformador regulador de módulo de la tensión que controla el nudo 5.....	65
Figura 5.7. Sistema estudiado con la inclusión del transformador regulador de la fase de la tensión.	67
Figura 5.8. Diagrama de flujo para el algoritmo de resolución del flujo de potencia con un transformador regulador de tipo PS.....	68
Figura 5.9. Representación del flujo de potencia por el sistema al introducir un transformador regulador del ángulo o PS.....	74
Figura 5.10. Representación del flujo de potencia por el sistema al introducir un transformador regulador del ángulo o PS.	77
Figura 6.1. Gráfica de nariz o PV del sistema en el nudo 5 cuando no hay transformador regulador en el sistema.	81
Figura 6.2. Gráfica de nariz o PV del sistema en el nudo 5 cuando no hay transformador regulador en el sistema.	82
Figura 6.3. Gráfica de nariz o PV del sistema en el nudo 5 cuando no hay transformador regulador en el sistema.....	82
Figura 6.4. Representación de los efectos producidos al disminuir el factor de potencia inductivo.	83

Figura 6.5. Representación de los efectos producidos al disminuir el factor de potencia capacitivo.....	84
Figura 6.6. Gráfica PV o nariz para el nudo 6 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.....	85
Figura 6.7. Gráfica PV o de nariz para el nudo 6 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.....	86
Figura 6.8. Gráfica PV o de nariz para el nudo 6 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.....	86
Figura 6.9. Gráfica PV o de nariz para el nudo 8 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.....	87
Figura 6.10. Gráfica PV o de nariz para el nudo 8 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.....	88
Figura 6.11. Gráfica PV o de nariz para el nudo 8 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.....	88
Figura 6.12. Gráfica de nariz o PV para el nudo 5 controlado por el transformador regulador LTC en el sistema estudiado.....	91
Figura 6.13. Gráfica de nariz o PV para el nudo 5 controlado por el transformador regulador LTC en el sistema estudiado.....	92
Figura 6.14. Gráfica de nariz o PV para el nudo 5 controlado por el transformador regulador LTC en el sistema estudiado.....	92
Figura 6.15. Gráfica de la posición de la toma del transformador regulador con respecto a la potencia activa absorbida en la carga.	94
Figura 6.16. Gráfica de la posición de la toma del transformador regulador con respecto de la potencia absorbida en la carga.	94
Figura 6.17. Gráfica de la posición de la toma del transformador regulador con respecto de la potencia absorbida en la carga.	95
Figura 6.18. Gráfica de PV o de nariz del nudo 6 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5. (LTC)	97
Figura 6.19 Gráfica de PV o de nariz del nudo 6 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC)	97
Figura 6.20. Gráfica de PV o de nariz del nudo 6 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC)	98
Figura 6.21 Gráfica de PV o de nariz del nudo 8 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC).....	99
Figura 6.22. Gráfica de PV o de nariz del nudo 8 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC) con otros factores de potencia.....	99
Figura 6.23. Gráfica de PV o de nariz del nudo 8 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC).....	100
Figura 6.24 Gráfica PV del nudo 5 sin transformador regulador LTC con factor de potencia del caso base y límites adecuados señalizados (0.95-1.05 pu).....	103
Figura 6.25. Gráfica PV del nudo 5 con transformador regulador LTC con factor de potencia del caso base	103

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 5.1. Datos de los nudos del sistema.....	48
Tabla 5.2. Datos de los generadores del sistema.....	48
Tabla 5.3. Datos de las líneas del sistema.....	49
Tabla 5.4. Datos de las cargas del sistema.....	49
Tabla 5.5. Número de iteraciones para la convergencia en flujo de potencia sin transformador regulador.....	55
Tabla 5.6. Resultados tensiones del flujo de potencia sin transformador regulador en el sistema.....	55
Tabla 5.7 Flujos de potencias en por unidad por las líneas para el caso sin transformador reguladores.....	55
Tabla 5.8 Pérdidas totales potencia activa en por unidad del sistema.....	56
Tabla 5.9. Datos del transformador regulador de módulo de la tensión.....	58
Tabla 5.10. Numero iteraciones para la convergencia en flujo de potencia con transformador regulador LTC.....	64
Tabla 5.11. Tensiones del flujo de cargas con transformador regulador LTC en el sistema.....	64
Tabla 5.12 Flujos de potencia en por unidad por las líneas para el caso con transformador regulador LTC en el sistema.....	65
Tabla 5.13 Pérdidas totales potencia activa en por unidad del sistema.....	66
Tabla 5.14. Posición toma del transformador LTC para control de la tensión en el nudo 5.....	66
Tabla 5.15. Datos del transformador regulador de fase.....	67
Tabla 5.16. Número de iteraciones necesario para llegar a la convergencia en el sistema con transformador PS.....	73
Tabla 5.17. Tensiones del flujo de potencia con transformador regulador PS en el sistema....	73
Tabla 5.18. Flujos de potencia en por unidad por las líneas para el caso con transformador regulador PS en el sistema.....	73
Tabla 5.19. Pérdidas totales potencia activa en por unidad con transformador PS.....	75
Tabla 5.20. Posición de la toma del transformador PS.....	75
Tabla 5.21. Número de iteraciones necesario para llegar a la convergencia en el sistema con transformador PS para el análisis de dicho transformador.....	75
Tabla 5.22. Tensiones del flujo de potencia con transformador PS para el análisis.....	76
Tabla 5.23 Flujos de potencia en por unidad por las líneas para el caso con transformador regulador PS en el sistema en el análisis.....	76
Tabla 5.24. Pérdidas totales potencia activa en por unidad del sistema con transformador PS en el análisis.....	78
Tabla 5.25. Posición de la toma del transformador PS para el análisis.....	78
Tabla 5.26. Límites de potencia activa por la línea 5.....	78
Tabla 6.1 Tabla comparativa de la estabilidad de los nudos ante diferentes factores de la carga en dichos nudos cuando no hay transformador regulador.....	89
Tabla 6.2. Tabla comparativa de estabilidad de nudos ante diferentes factores de carga en dichos nudos cuando el transformador regulador controla la tensión del nudo 5.....	100
Tabla 6.3. Tabla comparativa de la estabilidad de los nudos entre el sistema sin transformador LTC y con transformador LTC que regula el nudo 5.....	101
Tabla 8.1. Actividades llevadas a cabo para la realización del trabajo de fin de grado.....	106

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este primer capítulo se expondrán los antecedentes y objetivos que enmarca este trabajo de fin de grado. Se hará una breve introducción de la importancia del estudio de los transformadores reguladores. Luego, se enunciarán los objetivos generales y específicos que se quieren mostrar en este trabajo y por último se nombrarán las tareas llevadas a cabo.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Hoy en día el consumo de electricidad en el mundo es muy elevado comparándolo a como era hace años. La red eléctrica, que es el medio de transporte de la electricidad, se expande cada vez más para abastecer la energía de lugares antes aislados.

En una red eléctrica existen gran variedad de elementos y cada uno tiene su función dentro de ella. El elemento a estudiar en este trabajo será el transformador con tomas o transformador regulador, cuya función principal es el control de diferentes variables en la red eléctrica. Existen diversos tipos de transformadores reguladores. Este trabajo se centrará en los transformadores reguladores del módulo de la tensión y los reguladores de la fase de la tensión. Como su nombre indica, el primero mencionado tratará de controlar la tensión en un nudo elevador o reductor según los objetivos que se tengan. El segundo tipo de transformador regulador tendrá como función el control de potencia por una línea. Ambos tendrán unos límites de operación y podrían no conseguir llevar a cabo el control requerido.

Cabe destacar la importancia de estos transformadores para el control de la red eléctrica. A parte de ellos, existen diversos medios de control de las variables de la red eléctrica. Cada uno tiene sus ventajas e inconvenientes. Sin embargo, en este trabajo sólo se tratarán los transformadores reguladores debido a su gran extensión.

1.2 OBJETIVOS.

Los objetivos de este trabajo vienen detallados en este apartado. Están divididos en objetivos de carácter general o global y en objetivos más específicos y detallados. Los objetivos generales son necesarios para el entendimiento de los objetivos específicos.

1.2.1 Objetivos generales.

Como ya se ha mencionado en la introducción, este trabajo trata sobre los transformadores reguladores que existen en el sistema eléctrico. Los objetivos generales de este trabajo son los definidos a continuación.

Para llevar a cabo el análisis de un transformador regulador y su impacto en la red eléctrica es necesario hacer una simulación de su comportamiento en un determinado sistema. Por ello, en este trabajo uno de los objetivos será explicar y definir el flujo de potencia. Este es un método iterativo de solución, mediante el cual se obtienen las tensiones y flujos de potencia activa y reactiva por las líneas. El objetivo será explicar lo mejor posible el funcionamiento de este método. El método utilizado en este trabajo será el conocido como Newton-Raphson.

Dado que el transformador regulador de módulo tiene como función controlar la tensión, otro objetivo de este trabajo será el análisis de la estabilidad de tensión de un sistema. La estabilidad de tensión es un concepto muy importante hoy en día ya que si esta no se da, el sistema puede sufrir daños irreversibles en los elementos que lo componen. El objetivo será estudiar esta estabilidad junto con la inclusión del transformador regulador de módulo de la tensión para analizar el comportamiento de este.

1.2.2 Objetivos específicos.

Los objetivos más específicos relacionados con este trabajo se definen en este apartado. El principal objetivo es el estudio de ambos transformadores ya mencionados. En primer lugar se definirán sus características y modelos matemáticos. En segundo lugar se introducirán en el sistema a estudiar para ver la influencia de dichos elementos sobre el sistema. Se realizarán flujos de potencia tanto con los transformadores reguladores como sin ellos para poder analizar los cambios que producen en el sistema cuando existe un método de control y cuando no.

1.3 ANTECEDENTES.

En este trabajo se han realizado las siguientes tareas definidas a continuación.

- Se ha definido el concepto de flujo de potencia para el estudio de un determinado sistema y se ha explicado el método Newton-Raphson que es el utilizado en este trabajo. También se han definido previamente unos conceptos básicos necesarios para el entendimiento de la materia.
- Se ha determinado el concepto de estabilidad de tensión, necesario para el análisis del transformador regulador de módulo. Se han definido los elementos

del sistema que influyen en dicha estabilidad y los diferentes métodos que existen para el control de dicha estabilidad a parte del estudiado en este trabajo.

- Se han estudiado los transformadores reguladores, funciones y tipos tanto como las ecuaciones que los modelan y sus características de funcionamiento.
- Se han realizado tres modelos en Matlab© para el análisis de dichos transformadores de un mismo sistema. El primer algoritmo en Matlab© no incluye ningún transformador regulador. El segundo algoritmo incluye un transformador regulador de modulo y el tercero un transformador regulador de la fase de la tensión.
- Por último se ha llevado a cabo un análisis de la estabilidad sobre el segundo algoritmo mencionado anteriormente en dicho sistema estudiado. Se ha realizado un aumento progresivo de la potencia absorbida por las cargas del sistema para ver como varia la tensión de los nudos. Se han estudiado los diferentes puntos en los que se pierde la estabilidad dependiendo del tipo de carga que se ha variado.

2. FLUJO DE POTENCIA.

En este capítulo se van a introducir los conceptos clave para realizar un flujo de potencia en un determinado sistema. En primer lugar se hará una breve introducción de los objetivos de realizar un flujo de potencia. Tras esto, se definirán los conceptos de red eléctrica, los distintos tipos de análisis que existen, el sistema de valores en por unidad y los parámetros de las líneas de transmisión necesarios para realizar un flujo de potencia para un sistema dado.

Después, se comenzará a describir el sistema de resolución del flujo de potencia mediante las iteraciones. Se introducirá el método de Newton-Raphson que será el utilizado en este trabajo para el análisis de un sistema eléctrico al incluir un transformador con tomas regulables.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Para llevar a cabo el modelado y análisis de un transformador con tomas regulables, será necesario introducirlo en un sistema eléctrico con determinadas características. Para resolver esta red se deberá introducir el concepto de flujo de potencia.

En una red se han de satisfacer unos objetivos determinados:

- La magnitud de la tensión en los nudos ha de estar entre unos valores determinados. Estos valores han de estar cercanos a la unidad en por unidad. El rango de valores habituales es de 0.95 a 1.05 en por unidad.
 - La frecuencia también ha de estar en un determinado rango de valores.
 - La onda de corriente y tensión ha de ser lo más cercana posible a una onda sinusoidal.
 - Las líneas de transmisión tienen una estabilidad térmica límite. El flujo de potencia por las líneas está limitado.
 - Las interrupciones a corto plazo deben ser mínimas.
 - Los costes de transmisión de la potencia han de ser lo más reducidos posibles.
- [6].

El objetivo principal de realizar un flujo de potencia es determinar las condiciones de operación de una red en régimen permanente. Este régimen permanente se determinará para unas condiciones determinadas de carga. Las variables a obtener serán los flujos de potencia activa y potencia reactiva por las líneas del sistema a estudiar y las tensiones en los nudos tanto en módulo como en argumento o fase.

Si un nivel de tensión en un nudo esta fuera de los límites o la capacidad de la línea es superada en cuanto a la potencia transmitida, será necesario realizar acciones de control sobre ello. Una de las acciones de control es el objeto de estudio de este trabajo, el transformador de tomas variables.

2.2 CONCEPTOS BÁSICOS.

En este trabajo, será necesario introducir una serie de conceptos clave básicos para su entendimiento. Estos conocimientos serán utilizados para poder estudiar el tema concerniente.

2.2.1 Red eléctrica.

En primer lugar se definirá el concepto de una red de energía eléctrica. Se trata de la estructura por medio de la cual la electricidad es generada, transportada, distribuida y consumida. Sus características más importantes son:

- Grandes dimensiones.
- Elevada utilización.
- Necesidad de equilibrio entre generación y el consumo.

El análisis de una red eléctrica puede ser de diferentes tipos, los cuales están descritos a continuación:

1. Estacionario: Se trata de una modelización de la red eléctrica por medio de un circuito en régimen estacionario sinusoidal. Este modelo incluye el llamado flujo de potencias, mediante el cual se obtendrán en este trabajo las soluciones buscadas. En este método se utilizaran ecuaciones no lineales. Sólo se tendrán en cuenta variables eléctricas.

2. Electromecánico: Este modelado también se conoce como régimen dinámico, en el cual la variables a tener en cuenta serán tanto eléctricas como mecánicas (generadores y motores). La metodología utilizada consta de procesos iterativos del análisis fasorial eléctrico y la solución de las ecuaciones diferenciales mecánicas. Se utiliza en estabilidad transitoria.

3. Electromagnético: Este régimen también se llama régimen transitorio en el cual la red se representa y modela mediante ecuaciones diferenciales tanto en la parte eléctrica como en la mecánica. Debido a la magnitud de la redes, las variables mecánicas se suelen considerar constantes. [1]

En este trabajo, el modelado de los diferentes tipos de transformadores reguladores se realizará en régimen permanente, es decir, en régimen estacionario.

También se ha de introducir el concepto de sistema trifásico, mostrado en la **Figura 2.1**. Las redes eléctricas generalmente son trifásicas, es decir, que el transporte de electricidad se lleva a cabo por medio de tres cables. Cada cable será una fase. La generación y consumo también se realiza trifásicamente. Las corrientes transportadas por cada hilo son iguales en amplitud y en frecuencia. El sistema estará equilibrado si estas corrientes son iguales y desfasadas un ángulo simétricamente unas de otras. [2]

La utilización de un sistema trifásico tiene una serie de ventajas:

- La generación es mayor en las máquinas trifásicas. (Mayores rendimientos)
- La transmisión es más económica dado que se necesita menos material conductor. (Los hilos o cables son más finos)
- La salida de los sistemas trifásicos es estable.
- La potencia instantánea es constante. [3]



Figura 2.1. Ejemplo de línea de transporte trifásica de la red eléctrica. *Fuente:* [4].

Debido al funcionamiento equilibrado de las redes eléctricas, su modelado se realizará mediante sistemas monofásicos equivalentes. Esto quiere decir que solo se tendrá en cuenta una fase suponiendo que el resto de las fases están equilibradas. Estos sistemas monofásicos equivalentes se reproducirán mediante el sistema en por unidad.

2.2.2 Valores en por unidad.

Una red eléctrica tiene infinidad de parámetros que se han de tener en cuenta. Es más sencillo realizar una normalización de estos parámetros debido a las diferentes tensiones y potencias que presenta la red eléctrica. Estos valores en por unidad aportan sencillez a la resolución de los sistemas eléctricos.

Su definición principal es el valor real dividido entre el valor considerado como base. Estos valores base serán los módulos de las tensiones, corrientes, impedancias y admitancias. También la potencia aparente o potencia compleja. Se necesitará la operación contraria para volver a pasar a valores reales.

En el caso de trabajar con un sistema monofásico equivalente a partir de un trifásico, los valores base utilizados serán la potencia trifásica y la tensión de línea, que es la tensión entre dos de las fases del sistema trifásico. Cabe mencionar que la potencia trifásica base es la misma en todo el sistema. En cambio, la tensión de base será una en cada zona, estando diferenciada cada zona por medio de transformadores de potencia que transforman de un nivel de tensión a otro. En el caso de hallarse un transformador de potencia en el sistema de estudio, los valores en por unidad son muy útiles.

Los otros dos valores base se hallaran con las siguientes ecuaciones:

$$Z_{base} = \frac{U_{base}^2}{S_{base}} \quad (2.1)$$

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times U_{base}} \quad (2.2)$$

2.2.3 Parámetros de las líneas de transmisión. [5]

Se van a definir brevemente los parámetros que modelan las líneas de la red eléctrica para su posterior entendimiento y uso. En primer lugar en la siguiente imagen (**Figura 2.2**) se pueden apreciar los constituyentes de una línea de transmisión (la utilizada en este trabajo) y como están distribuidos a lo largo de la línea.

Estos parámetros se utilizaran mas tarde a la hora de modelar el sistema que se analizará en este trabajo, por ello es importante definirlos. Con estos parámetros es posible modelar líneas eléctricas de diferentes tamaños y simplificaciones.

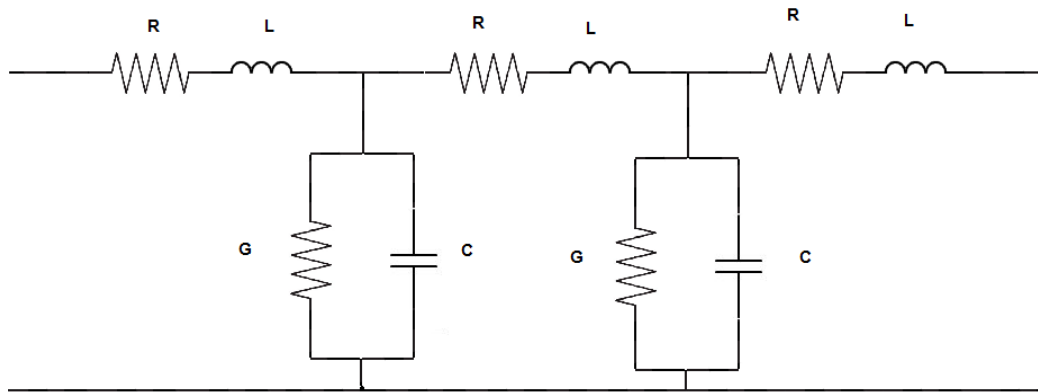


Figura 5.2. Distribución de los parámetros en una línea eléctrica de transmisión.

- Resistencia (R): Es la oposición de los electrones al pasar por un material conductor. Es la principal causante de las pérdidas de energía por la línea.
- Conductancia (G): Se denomina a la propiedad de transportar, mover o desplazar electrones; es decir, es la propiedad inversa de la resistencia eléctrica. Se debe a las corrientes de fuga entre las fases y la tierra.
- Inductancia (L): Cuando una corriente circula por un conductor crea un campo magnético formando lazos alrededor de dicho material.
- Capacidad (C): Está relacionada con el campo eléctrico generado por la carga eléctrica que existe en los conductores y entre los conductores y tierra.
- Reactancia (X): Se denomina a la oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por inductores (bobinas) y condensadores.

$$XC = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.3)$$

$$XL = \omega L = 2\pi f L \quad (2.4)$$

Por lo cual en conjunto:

- Impedancia (Z) serie: Está formada por una parte real, la resistencia, y una parte imaginaria, la reactancia, que puede ser o bien inductiva o bien capacitiva.

$$Z = R + jX \quad (2.5)$$

- Admitancia (Y) derivador (shunt): Esta formada por una parte real, que es la conductancia y por una parte imaginaria que es la susceptancia. Es la inversa de la impedancia.

$$Y = G + jB = \frac{1}{Z} \quad (2.6)$$

Donde:

$$B = \frac{-X}{R^2 + X^2} \quad (2.7)$$

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (2.8)$$

- Susceptancia (B): Es la parte imaginaria de la admitancia.

Teniendo en cuenta las definiciones básicas anteriores, en este trabajo se modelarán las líneas eléctricas de transmisión a partir de parámetros concentrados que son las necesarias para el posterior estudio de los transformadores reguladores. En función de la longitud de la línea tenemos varios tipos de modelos. En primer lugar, el modelo de línea corta en el cual solo se tiene en cuenta la resistencia y reactancia de la inductancia se representa en la **Figura 2.3**.

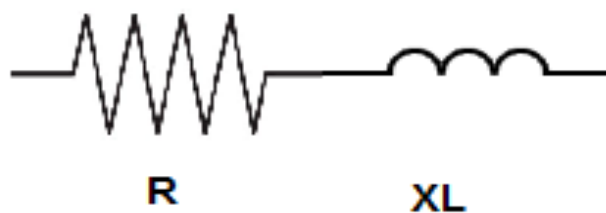


Figura 2.6. Representación modelo línea corta.

En segundo lugar el modelo de línea mediana representado en la **Figura 2.4**, ya tiene en cuenta la admitancia en paralelo (derivación o *shunt*). Al tratarse de una línea aérea la conductancia no se representa ya que es nula.

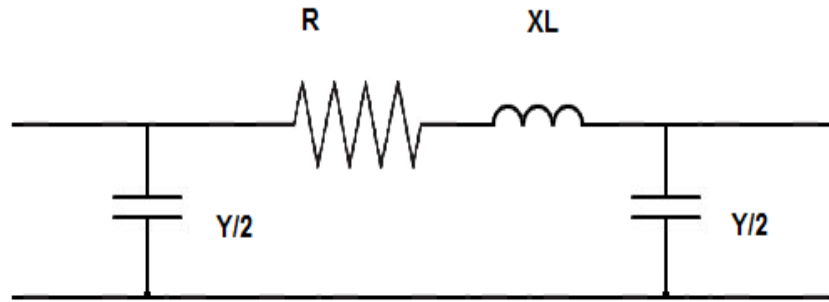


Figura 2.7 Representación modelo línea mediana. Modelo en π .

Por último en la **Figura 2.5** se muestra el modelo de línea larga para una sección de línea de longitud Δx . La corriente y la tensión van a variar para cada incremento infinitesimal de longitud Δx . Este último modelo es de parámetros distribuido que sale del alcance del análisis y estudio de este trabajo.

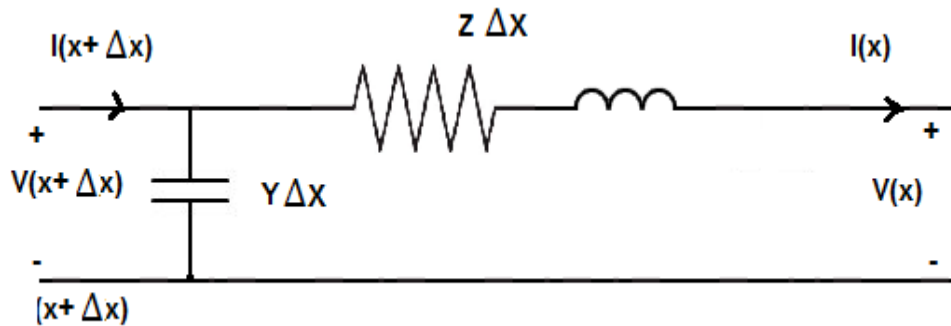


Figura 2.8 Representación modelo línea larga.

Por lo tanto, en este trabajo el modelo a seguir será el modelo de línea mediana de parámetros concentrados. Como ya se ha mencionado, las líneas a tratar serán aéreas y por ello no tendrán conductancia de derivación.

2.2.4 Clasificación de los nudos.

En el flujo de potencia, existen cuatro variables que definen un determinado nudo. Estas variables son la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q), el módulo de la tensión (VM) y por último, el argumento de la tensión (VA). De estas cuatro variables, dos deben ser conocidas para que el flujo de potencia pueda ser solucionado. Estas dos variables conocidas en el nudo están determinadas por lo que esté conectado a ese determinado nudo del sistema. Por lo cual, la clasificación de los nudos está determinada por estas dos variables y son los siguientes:

- **Nudo PQ de carga:** Un nudo de este tipo no tiene conectado ningún generador. Debido a esto, la potencia activa y reactiva generada es cero. Es conocida la potencia activa y reactiva absorbida por la carga. Por lo cual las potencias son conocidas y el módulo y el argumento de la tensión son las variables a calcular.
- **Nudo PV de generador:** A este tipo de nudo, se encuentra normalmente conectado un generador síncrono. Al tener un generador que es un medio de control de la tensión por medio de la corriente, es conocido el valor del módulo de la tensión. Este generador puede absorber o inyectar potencia reactiva a la red. La potencia activa generada es un valor conocido junto con el módulo de la tensión. Las variables a calcular serán el ángulo y la potencia reactiva absorbida o generada. El valor del módulo de la tensión será constante siempre y cuando los límites de potencia reactiva del generador no se sobrepasen.
- **Nudo PQ de generador:** Este tipo de nudo se da cuando los límites de potencia reactiva del generador mencionados anteriormente no son suficientes para que el módulo de la tensión en ese nudo sea el requerido. En este caso, el valor de la reactiva se quedara en el límite y el módulo de la tensión variará. Esto da lugar a que la potencia activa y reactiva generada sea conocida y que el valor del módulo y argumento de la tensión sea calculado. El nudo pasará de ser un nudo PV a un nudo PQ.
- **Nudo oscilante (slack o swing):** Este nudo es elegido entre todos los nudos con generadores síncronos en el sistema eléctrico que tenga la mayor capacidad de potencia de cortocircuito, es decir, una corriente de cortocircuito muy elevada. En él se conoce el módulo y argumento de la tensión. Sólo existe un nudo de este tipo en la red a estudiar. La función de este tipo de nudos es proveer la suficiente potencia para:
 - Una carga sin abastecer si está conectada al nudo oscilante.
 - Pérdidas en la red, un hecho que no es conocido antes de realizar el flujo de potencia.

El ángulo de la tensión de este nudo es elegido como referencia y normalmente su valor es de cero grados. [6]

2.2.5 Construcción matriz de admitancias. [7]

Para llevar a cabo la matriz de admitancias se utilizará el siguiente sistema representado en la **Figura 2.6** como ejemplo explicativo.

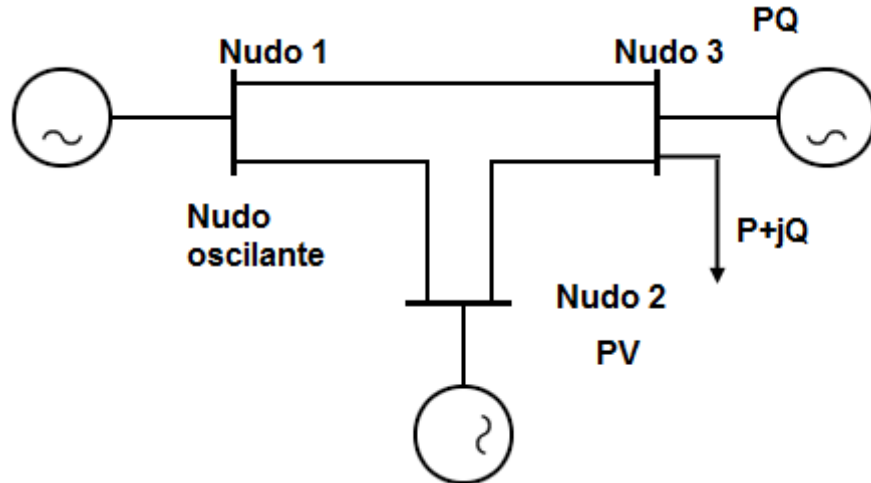


Figura 2.6. Ejemplo sistema para la construcción de la matriz de admitancias. Fuente: [7]

Es necesaria la transformación de este sistema para llevar a cabo un análisis nodal ya que es más sencillo a la hora de la construcción de la matriz de admitancias. El sistema quedará representado en la **Figura 2.7.**

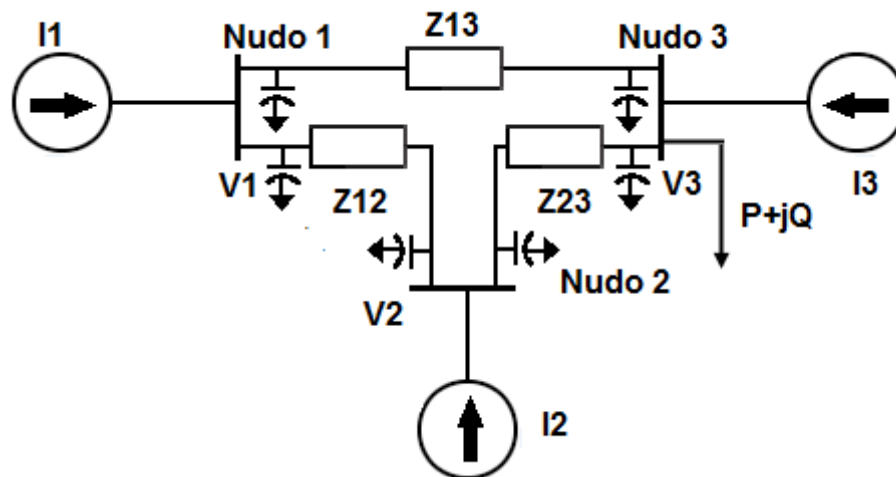


Figura 2.7. Ejemplo para la construcción de la matriz de admitancias en análisis nodal. Fuente: [7]

Se puede apreciar que cada línea de transmisión tiene una impedancia formada por una resistencia y una reactancia. También se observan las respectivas susceptancias derivadoras al final y principio de cada línea.

$$Z = R + j\omega L \quad (2.9)$$

$$B_{derivador} = \omega C \quad (2.10)$$

Cabe mencionar que en los datos del sistema que se va a analizar en los próximos apartados, la susceptancia ($B_{derivador}$) ya está dividida a la mitad, ya que se refiere a la mitad de la línea a la hora de calcular la matriz. Se realizará el siguiente análisis nodal. La suma de las corrientes en el *nudo* 1 serán:

$$\bar{I}_1 = \bar{V}_1 \bar{Y}_{1G} + \bar{I}_{13} + \bar{I}_{12} \quad (2.11)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{V}_1 \bar{Y}_{1G} + \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_3}{Z_{13}} + \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{Z_{12}} \quad (2.12)$$

$$Y = 1/Z \quad (2.13)$$

Donde:

- \bar{Y}_{1G} : Será la suma de las admitancias (solo hay susceptancia) conectadas a tierra de la mitad de cada línea en contacto con el nudo 1.

$$\bar{I}_1 = \bar{V}_1 \bar{Y}_{1G} + \bar{V}_1 \bar{Y}_{13} - \bar{V}_3 \bar{Y}_{13} + \bar{V}_1 \bar{Y}_{12} - \bar{V}_2 \bar{Y}_{12} \quad (2.14)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{V}_1 (\bar{Y}_{1G} + \bar{Y}_{13} + \bar{Y}_{12}) - \bar{V}_3 \bar{Y}_{13} - \bar{V}_2 \bar{Y}_{12} \quad (2.15)$$

Para el nudo 2 y el nudo 3 se hará de igual forma:

$$\bar{I}_2 = \bar{V}_2 (\bar{Y}_{2G} + \bar{Y}_{23} + \bar{Y}_{12}) - \bar{V}_3 \bar{Y}_{23} - \bar{V}_1 \bar{Y}_{12} \quad (2.16)$$

$$\bar{I}_3 = \bar{V}_3 (\bar{Y}_{3G} + \bar{Y}_{13} + \bar{Y}_{23}) - \bar{V}_2 \bar{Y}_{23} - \bar{V}_1 \bar{Y}_{13} \quad (2.17)$$

En forma matricial quedará la ecuación **2.18**.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\bar{Y}_{1G} + \bar{Y}_{13} + \bar{Y}_{12}) & -\bar{Y}_{13} & -\bar{Y}_{12} \\ -\bar{Y}_{12} & (\bar{Y}_{2G} + \bar{Y}_{23} + \bar{Y}_{12}) & -\bar{Y}_{23} \\ -\bar{Y}_{13} & -\bar{Y}_{23} & (\bar{Y}_{3G} + \bar{Y}_{13} + \bar{Y}_{23}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Se aprecia que la matriz de admitancias es de dimensiones 3×3 , es decir, la matriz de admitancias tendrá unas dimensiones de $n^\circ \text{ de nudos} \times n^\circ \text{ de nudos}$. Esta matriz de admitancias será equivalente a la expresión **2.19**.

$$Y = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{13} \\ \bar{Y}_{12} & \bar{Y}_{22} & \bar{Y}_{23} \\ \bar{Y}_{13} & \bar{Y}_{23} & \bar{Y}_{33} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Por lo cual, fuera del ejemplo propuesto, de forma genérica para un nudo k conectado a un nudo m se cumplen las siguientes ecuaciones.

$$Y_{kk} = Y_{kG} + \sum_{m \neq k} \frac{1}{Z_{km}} \quad (2.20)$$

$$Y_{km} = -\frac{1}{Z_{km}} \quad (2.21)$$

Debido a que en los datos del sistema que se analizará se dan los valores de las impedancias de las líneas, habrá que calcular los valores de las admitancias mediante las formulas siguientes basadas en las ecuaciones 2.7 y 2.8.

- $-Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$ (2.22)

- $G_{km} = -\frac{R_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2}$ (2.23)

- $B_{km} = \frac{X_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2}$ (2.24)

- $Y_{kk} = G_{kk} + jB_{kk}$ (2.25)

- $G_{kk} = \frac{R_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} + G_{derivador}$ (2.26)

- $B_{kk} = -\frac{X_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} + B_{derivador}$ (2.27)

Donde:

- $B_{derivador} = B_{kG}$. Suma de la mitad de las susceptancias de los derivadores de las líneas que conectan el nudo k .
- $G_{derivador} = G_{kG}$. Suma de la mitad de las conductancias de los derivadores de las líneas que conectan el nudo k . Suele ser considerada cero.

2.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA FLUJO DE POTENCIA.

Existen diversos métodos iterativos para la resolución de un flujo de potencia. Básicamente, consisten en la resolución de un conjunto de ecuaciones no lineales y algebraicas que describen el sistema a analizar en régimen permanente. Antiguamente el método utilizado para resolver un flujo de potencia estaba basado en Gauss. Sin embargo, al ser muy laborioso se introdujo el análisis nodal aunque su convergencia era poco confiable. Después apareció el método de Gauss- Seidel pero seguía teniendo una convergencia muy lenta cuando se trataba de un sistema de grandes dimensiones. Por último se introdujo el método de Newton-Raphson que será el utilizado en este trabajo y solucionaba todos los problemas anteriores. Este método ha sido demostrado que es el más exitoso debido a su fuerte convergencia. [6]

2.3.1 Método de Newton-Raphson

En este método, como se ha mencionado antes, se utiliza la iteración para resolver un conjunto de ecuaciones no lineales del tipo:

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 f_3(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0
 \end{aligned} \quad (2.28)$$

Inicialmente se utiliza simplemente una ecuación no lineal con una única variable para una primera explicación.

$$f(x) - c = 0 \quad (2.29)$$

Donde:

- c es una constante.
- $f(x)$ representa una función no lineal de una variable.
- x es una variable desconocida.

Para determinar el valor de x que cumpla la ecuación **2.29** se utilizará un valor inicial estimado $x^{(0)}$. Se deberá calcular un incremento o variación Δx para ir aproximando a la solución real. La ecuación **2.29** se convierte en:

$$f(x + \Delta x) - c = 0 \quad (2.30)$$

Por medio de la expansión de series de Taylor se consigue la ecuación **2.31**. En esta expresión se han obviado los términos de orden mayor debido a la cercanía de los resultados entre una iteración y otra.

$$\left[f(x^{(0)}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^{(0)}} \Delta x \right] - c = 0 \quad (2.31)$$

Como el objetivo es calcular el incremento Δx :

$$\Delta x = - \frac{f(x^{(0)}) - c}{\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^{(0)}}} \quad (2.32)$$

Una vez obtenido este incremento con la ayuda de la ecuación **2.33** se calculará un nuevo estado.

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x \quad (2.33)$$

Así sucesivamente se hará lo mismo para este nuevo valor:

$$\Delta x = - \frac{f(x^{(1)}) - c}{\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x^{(1)}}} \quad (2.34)$$

$$x^{(2)} = x^{(1)} + \Delta x \quad (2.35)$$

Este proceso iterativo se repetirá hasta que $\Delta x < \varepsilon$, siendo ε una tolerancia cercana a cero y por ello llegando a la convergencia ya que se cumple la ecuación **2.29**.

Ahora, suponiendo que se tengan un conjunto de ecuaciones no lineales como las expuestas en la ecuación **2.28** como es el caso del flujo de potencia.

$$f(x^0) + J_{(0)} \Delta x^{(0)} = 0 \quad (2.36)$$

Donde:

- $J_{(0)}$ es la matriz de derivadas parciales de primer orden de $f(x)$ con respecto a x . Se conoce como matriz **Jacobiana**, en este caso evaluada en $X = X^{(0)}$.

Entonces las nuevas variables estimadas serán halladas con la siguiente ecuación **(2.18)**.

$$x^{(1)} = x^{(0)} - J_{(0)}^{-1} f(x^{(0)}) \quad (2.37)$$

El proceso finalizará como ya se ha mencionado cuando todas las incrementos de todas las variables desconocidas sean menor que una tolerancia definida cercana a cero. La ecuación anterior **2.36** mostrada en forma matricial es:

$$\begin{bmatrix} f1(x^{(0)}) \\ f2(x^{(0)}) \\ \vdots \\ fn(x^{(0)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f1(x)}{\partial x1} & \frac{\partial f1(x)}{\partial x2} & \dots & \frac{\partial f1(x)}{\partial xn} \\ \frac{\partial f2(x)}{\partial x1} & \frac{\partial f2(x)}{\partial x2} & \dots & \frac{\partial f2(x)}{\partial xn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial fn(x)}{\partial x1} & \frac{\partial fn(x)}{\partial x2} & \dots & \frac{\partial fn(x)}{\partial xn} \end{bmatrix}_{X=X^{(0)}} \begin{bmatrix} X1^{(1)} - X1^{(0)} \\ X2^{(1)} - X2^{(0)} \\ \vdots \\ Xn^{(1)} - Xn^{(0)} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.38)$$

2.3.2 Newton-Raphson aplicado al flujo de potencia. [6]

El método anteriormente descrito sirve para cualquier escenario con un conjunto de ecuaciones no lineales a resolver. En este trabajo se necesitará para la resolución de flujo de potencia y es descrito en este apartado.

La ecuación 2.36 para el caso de flujo de potencia queda de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(0)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} V \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(0)} = 0 \quad (2.39)$$

El objetivo será hallar el término $\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^{(0)}$ para sumárselo a los valores iniciales estimados del módulo de la tensión y el argumento.

- **Calculo de Potencias de Desajuste:** $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(0)}$

En primer lugar, en un determinado nudo, la suma de generación, carga y potencia intercambiada debe ser cero. Esto incluye la potencia activa y reactiva. Con este dato se formulan las siguientes ecuaciones, conocidas como ecuaciones de desajuste de potencias.

En un determinado nudo denominado con el subíndice k:

$$\Delta P_k = PG_k - PL_k - P_{kcal} = P_{kneta} - P_{kcal} = 0 \quad (2.40)$$

$$\Delta Q_k = QG_k - QL_k - Q_{kcal} = Q_{kneta} - Q_{kcal} = 0 \quad (2.41)$$

Donde:

- ΔP_k y ΔQ_k son el desajuste de la potencia en ese nudo.
- PG_k y QG_k son la potencia activa y reactiva generada en ese nudo por un generador.
- PL_k y QL_k son la potencia activa y reactiva absorbida en el nudo por la carga. Se asume que estas variables anteriores son conocidas y controladas.
- P_{kcal} y Q_{kcal} son calculadas con el flujo de potencia.

Como las tensiones en los nudos no se conocen y se tienen que estimar en un principio, las potencias calculadas serán aproximadas y las potencias de desajuste no serán cero. En este caso, el cálculo del flujo de potencia consiste en corregir sucesivamente las tensiones calculadas y consecuentemente las potencias transmitidas hasta que los valores sean suficientemente precisos como para que las potencias de desajuste se hagan cero o cercanas a cero.

Normalmente, en un sistema o red, un nudo une varias líneas de transmisión, por lo cual potencia activa y reactiva calculada (P_{kcal} y Q_{kcal}) será:

$$P_{kcal} = \sum_{i=1}^n P^i_{kcal} \quad (2.42)$$

$$Q_{kcal} = \sum_{i=1}^n Q^i_{kcal} \quad (2.43)$$

Estas fórmulas para calcular los valores de P_{kcal} y Q_{kcal} en el nudo k están definidas a continuación con la ayuda de la siguiente **Figura 2.8**.

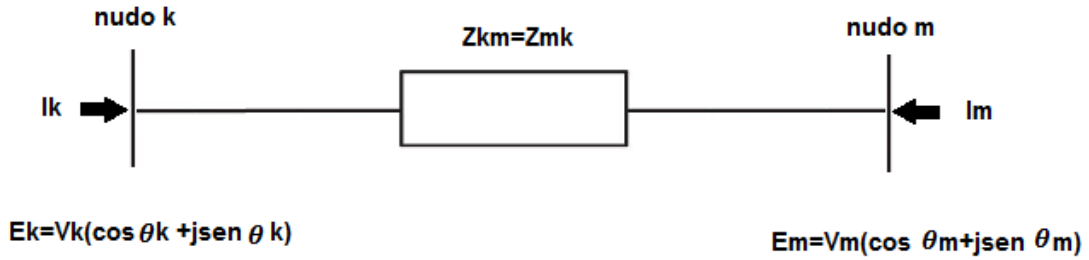


Figura 2.8. Línea transmisión con impedancia equivalente de un nudo k a un nudo m .

Las corrientes que fluyen por la línea desde el nudo k y desde el nudo m serán:

$$I_k = I_{km} = \frac{1}{z_{km}}(E_k - E_m) = y_{km}(E_k - E_m) \quad (2.44)$$

$$I_m = I_{mk} = \frac{1}{z_{mk}}(E_m - E_k) = y_{mk}(E_m - E_k) \quad (2.45)$$

La admitancia es:

$$Y_{km} = G_{km} + jB_{km} \quad (2.46)$$

La potencia compleja que sale del nudo k será:

$$S_k = P_k + jQ_k = E_k I_k^* \quad (2.47)$$

Por lo cual sustituyendo las ecuaciones adecuadamente y separando los valores reales de los imaginarios:

$$P_{kcal} = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sen \theta_{km}] \quad (2.48)$$

$$Q_{kcal} = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sen \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \quad (2.49)$$

Donde:

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m = \text{diferencia ángulos de tensiones} \quad (2.50)$$

$$G_{kk} = \frac{R_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} = \text{conductancia no mutua} \quad (2.51)$$

$$G_{km} = \frac{-R_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} = \text{conductancia mutua} \quad (2.52)$$

$$B_{kk} = \frac{-X_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} = \text{susceptancia no mutua} \quad (2.53)$$

$$B_{km} = \frac{X_{km}}{R_{km}^2 + X_{km}^2} = \text{conductancia mutua} \quad (2.54)$$

Dos características han de introducirse en la matriz de potencias de desajuste:

1. Un factor que cabe mencionar es que las ecuaciones de desajuste ΔP y ΔQ del nudo oscilante no están incluidas (son cero) y que la potencia activa y reactiva de ese nudo se calculan al final del problema.
2. También, la potencia reactiva generada en un nudo PV se calcula en cada iteración para determinar si se ha salido de los límites impuestos. El termino ΔQ de un nudo PV tampoco está incluido (es cero).

- **Construcción matriz Jacobiana:** $\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} V^{(0)}$

Con respecto a la llamada **matriz Jacobiana**, cabe destacar que su número de elementos estará relacionado con el número de nudos (buses) que se van a analizar en el sistema estudiado. Las características de esta matriz son:

1. Son simétricas en estructura pero no en valores.
2. Otra característica es que cuando los nudos k y m en este caso no estén unidos mediante una línea o transformador, la parte de la matriz Jacobiana será nula.
3. Como las derivadas parciales de la matriz con respecto de V están multiplicadas por ese mismo término, en la expresión de desajuste de ΔV ese término está dividiendo. Esto se hace por simplicidad.
4. En la matriz Jacobiana no se incluirán las filas y columnas correspondientes a la potencia reactiva y el módulo de la tensión de los nudos de tipo PV (serán cero). En el nudo oscilante no se incluirán las filas y columnas de la potencia activa y reactiva con respecto del módulo y la fase.

La estructura es la siguiente para un ejemplo de la línea denominada l , que va de un nudo k a un nudo m . Habrá que derivar las expresiones anteriores de la potencia calculada en función de diferentes parámetros.

- Si $k \neq m$:

$$\frac{\partial P_k l}{\partial \theta_m l} = V_k V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \quad (2.55)$$

$$\frac{\partial P_k l}{\partial V_m l} V_m l = V_k V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial Q_k l}{\partial \theta_m l} = -V_k V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] = -\frac{\partial P_k l}{\partial V_m l} V_m l \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial Q_k l}{\partial V_m l} V_m l = V_k V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] = \frac{\partial P_k l}{\partial \theta_m l} \quad (2.58)$$

- Si $k = m$:

$$\frac{\partial P_k l}{\partial \theta_k l} = -Q_{kcal} - V_k^2 B_{kk} \quad (2.59)$$

$$\frac{\partial P_k l}{\partial V_k l} V_k l = P_{kcal} + V_k^2 G_{kk} \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial Q_k l}{\partial \theta_k l} = P_{kcal} - V_k^2 G_{kk} \quad (2.61)$$

$$\frac{\partial Q_k l}{\partial V_k l} V_k l = Q_{kcal} - V_k^2 B_{kk} \quad (2.62)$$

Como es habitual, si el nudo que estamos estudiando k tiene varias líneas de transmisión conectadas, los auto elementos o elementos no mutuos de la matriz (si $k = m$) serán las sumas de las derivadas de cada línea de transmisión.

Dadas todas las ecuaciones de este punto, es posible realizar el flujo de potencia cuando no hay ninguna línea con un transformador regulador. En el caso de haber un transformador de potencia, debido a que se está trabajando en valores por unidad, el transformador será tratado como una línea con una impedancia (o reactancia solo si el transformador no tiene pérdidas por resistencia) como el resto del sistema.

3. ESTABILIDAD DE TENSIÓN.

En este capítulo se va a introducir en primer lugar el concepto de estabilidad de un sistema eléctrico y los tipos de existen. También se conocerá si se pueden presentar en grandes o pequeñas perturbaciones. Tras esto, se definirá el concepto de estabilidad de tensión, que es el tema que concierne en este trabajo ya que el análisis tratará sobre ello. También se describirán los componentes de un sistema eléctrico que interfieren en la estabilidad de la tensión y los métodos de control de potencia reactiva para aumentar dichos niveles de tensión en los nudos del sistema. Por último, se definirá el concepto de colapso de tensión en un sistema aunque no se estudiará.

3.1 ESTABILIDAD DE UN SISTEMA.

La estabilidad de un sistema se refiere a la capacidad de un sistema de mantenerse en un estado de equilibrio en condiciones normales de operación y también bajo una perturbación. Un ejemplo de perturbación podría ser un cambio en las cargas del sistema (pequeña perturbación). El sistema ha de ajustarse el mismo a los cambios de condiciones. Otro caso sería el de una falta en una línea de transmisión (gran perturbación) o bien la pérdida de un generador de grandes dimensiones. [8]. Este trabajo está enfocado al estudio de la estabilidad en régimen permanente para escenarios con diferentes cargas. Estas cargas pueden ser de grandes o pequeñas magnitudes. Por ello, se analizará la estabilidad de tensión. En la siguiente **Figura 3.1** se representa la clasificación de la estabilidad en sistemas de potencia.

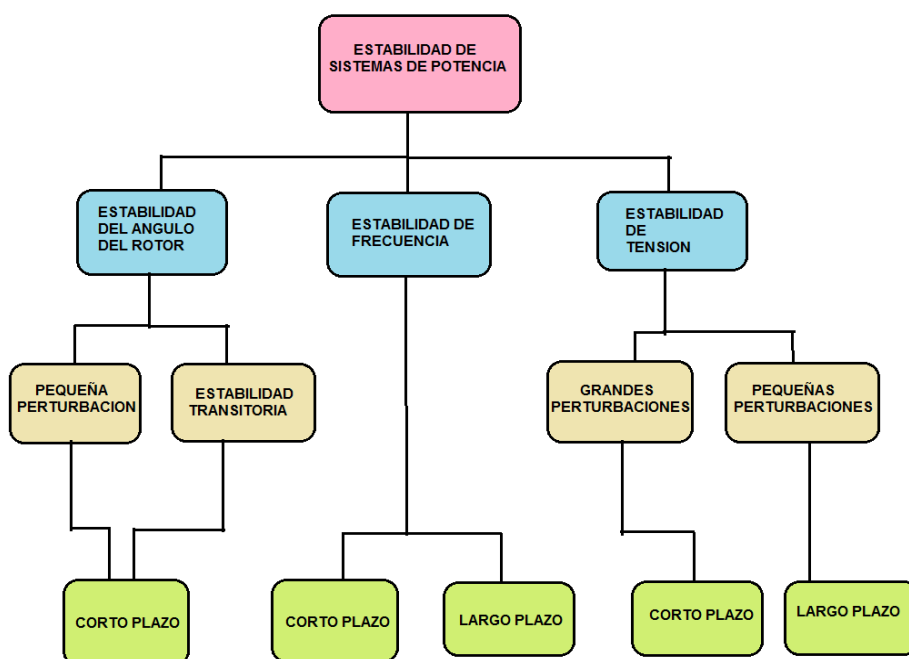


Figura 3.1. Clasificación de estabilidad de los sistemas de potencia. *Fuente:* [9]

3.2 ESTABILIDAD DE Tensión.

Se denomina así a la habilidad de un sistema de mantener una tensión aceptable en sus nudos en condiciones normales de operación o bien bajo una perturbación. Un sistema sufre una inestabilidad de tensión cuando, tras el aumento de una carga del sistema, sufre una gran caída de tensión en sus nudos. También se conoce como estabilidad de carga.

La principal causa de este efecto es que el sistema no es capaz de cumplir con la demanda de potencia reactiva que necesita. Un sistema será estable o inestable en tensión dependiendo del efecto que se obtiene al inyectar potencia reactiva en cualquier nudo del sistema. Si se inyecta potencia reactiva en cualquier nudo del sistema y la tensión aumenta en ese mismo nudo, el sistema será estable. Si por el contrario disminuye, aunque solo suceda en un nudo, el sistema será inestable. [8]

Una forma de analizar la estabilidad de un sistema es la representación de la potencia activa con respecto de la tensión en un determinado nudo. Estas curvas reciben el nombre de curvas de nariz debido a su parecido o curvas PV. Dado un determinado factor de potencia de la carga, al ir aumentando la potencia absorbida por ella, la tensión en dicho nudo ira variando.

Un ejemplo de curva de nariz o curva PV genérico se ilustra en la **Figura 3.2**.

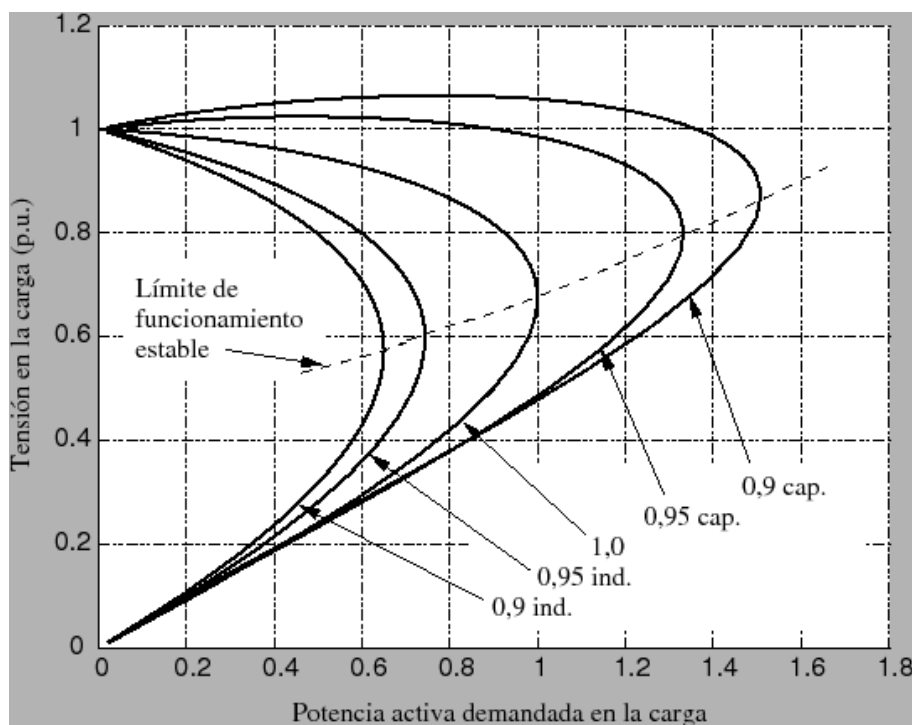


Figura 3.2. Curva de Nariz o curva PV para distintos factores de potencia inductivos o capacitivos. Fuente: [10].

Como se puede apreciar, dependiendo del factor de potencia, la curva se comporta de una forma u otra. Cabe destacar que:

$$S = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2} \tan^{-1} \left(\frac{Q}{P} \right) \quad (3.1)$$

$$P = UL \times IL \times \cos\varphi \quad (3.2)$$

$$Q = UL \times IL \times \sin\varphi \quad (3.3)$$

Donde:

- P = Potencia activa consumida por la carga.
- Q = Potencia reactiva consumida en la carga.
- UL = tensión de línea en la carga.
- IL = corriente de línea en la carga.
- φ = ángulo de la impedancia de la carga.
- $\cos\varphi$ = **factor de potencia de la carga**.

Por lo cual:

$$\frac{Q_{\text{reactiva}}}{P_{\text{activa}}} = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \tan\varphi \quad (3.4)$$

Con la ayuda de esta ecuación, se podrá calcular para un determinado factor de potencia, la relación entre la potencia activa y la potencia reactiva.

El factor de potencia puede ser:

- **Factor de potencia inductivo:** La carga absorbe tanto potencia activa como potencia reactiva.
- **Factor de potencia capacitivo:** La carga absorbe potencia activa y cede potencia reactiva al sistema.

Con la **Figura 3.2** se llegan las siguientes conclusiones:

- Si el factor de potencia es capacitivo: Con potencias activas pequeñas absorbidas por la carga, la tensión aumenta levemente al aumentar la potencia, y con potencias activas grandes disminuye.
- Si el factor de potencia es inductivo: La tensión siempre disminuye al aumentar la potencia absorbida en la carga. La tensión disminuye más rápido al aumentar la potencia activa absorbida si la carga es inductiva. Esto se debe a que la carga absorbe potencia reactiva.

En la **Figura 3.2**, la línea discontinua representa el límite de estabilidad. El sistema eléctrico no puede operar en puntos por debajo de esa línea. Dado que en este trabajo se van a realizar flujos de potencia con el programa Matlab, se debe mencionar que no es posible calcular dichos puntos por debajo de la estabilidad mediante un flujo de potencia. Si el sistema es inestable, la solución nunca converge y el algoritmo dará error. Aunque no se haya llegado a la inestabilidad todavía, las tensiones bajan por debajo de los límites establecidos ($1.05 - 0.95 \text{ pu}$) y eso tampoco es aceptable. Un sistema suele ser inestable cuando la potencia activa recorre un largo camino desde que es generada hasta que llega a la carga. [8]

En este trabajo se llevará a cabo un análisis de la estabilidad de la tensión mediante la realización de las curvas PV. Se analizará un caso sin transformador regulador y otro con transformador regulador de módulo o LTC.

3.2.1 Componentes de un sistema que influyen en la tensión. [8]

En un sistema eléctrico se encuentran diferentes componentes que influyen en el módulo de la tensión. Estos vienen descritos a continuación.

- Generadores síncronos: Pueden absorber o ceder potencia reactiva dependiendo de su excitación. Si la máquina está sobreexcitada, cederá potencia reactiva al sistema. En el sistema estudiado en este trabajo, serán de este tipo, pero no se ahondará en su funcionamiento.
- Líneas aéreas: Dependiendo de la corriente, absorben o ceden potencia reactiva. Si la carga es pequeña (por debajo de su carga natural), la línea producirá reactiva. Si la carga es grande, la absorberá.
- Líneas subterráneas: Tienen una gran capacidad y una alta carga natural. Por ello están siempre cargadas por debajo de su carga natural y producen potencia reactiva.
- Transformadores: Independientemente de su carga, siempre van a absorber potencia reactiva.
- Cargas: Lo normal es que absorban potencia reactiva. Cargas con un factor de potencia inductivo pequeño provocan grandes caídas de tensión en el sistema. Cuanto mayor es la potencia reactiva absorbida, más rápido decrece la tensión.
- Aparatos de compensación de reactiva: Pueden absorber o ceder reactiva para controlar el balance de potencias. En el siguiente apartado se enuncian los tipos.

3.2.2 Control de potencia reactiva y tensión.

El control de la tensión y de la potencia reactiva está relacionado. Además, para procurar la estabilidad del sistema se debe tener un control sobre los módulos de las tensiones y estos han de estar en un nivel estable de tensión. Para aumentar el módulo de la tensión en un determinado nudo es necesario inyectar potencia reactiva y viceversa. Cabe mencionar que el flujo de potencia activa y las fases de las tensiones entre dos nudos es independiente de la potencia reactiva y los módulos de las tensiones. Sin embargo cuando la línea está muy cargada, la potencia activa y el módulo de la tensión no están desacoplados.

Los objetivos que se han de tener en cuenta son:

- Tensiones en todos los terminales dentro de un límite. Si no lo están, los equipos y máquinas del sistema que están diseñados para trabajar dentro de un rango, podrían resultar dañados.
- El flujo de potencia reactiva debe ser mínimo. Para ello el sistema ha de operar de una forma eficiente.
- Se debe utilizar al máximo el sistema de transmisión.[8]

El principal problema de mantener los niveles de tensión es que las cargas varían su necesidad de potencia reactiva. Como la potencia reactiva no puede transmitirse en largas distancias, el control de la tensión se hará mediante aparatos dispersos por el sistema. Los aparatos usados para este propósito se clasifican:

a) Fuentes o sumideros de potencia reactiva:

1. Condensadores en paralelo. (shunt capacitors)
2. Reactancias en paralelo (shunt reactors)
3. Compensador síncrono (psynchronous condenser). Máquina sin carga.
4. SVCs (Static Var Compensators) o Compensadores estáticos.

b) Reactancias compensadoras de línea:

1. Condensadores en serie.

c) Transformadores reguladores:

1. Transformadores de tomas variables LTC o reguladores del módulo de la tensión.
2. Boosters.

Otro tipo de clasificación:

- a) Sistemas pasivos: Pueden estar conectados permanentemente o bien desconectados mediante interruptores. Modifican las características de la red.
- b) Sistemas activos: La potencia reactiva producida o absorbida se ajusta automáticamente. [8]

3.2.3 Colapso de tensión.

La principal diferencia es que la estabilidad de la tensión es un fenómeno local. Sin embargo, el colapso de la tensión es el resultado de una serie de eventos acompañados de inestabilidad de tensión que llevan a un estado de tensiones muy bajas en una parte significativa del sistema. En un sistema de potencias complejo hay muchos factores que inducen al colapso de la tensión.

- Capacidad del sistema de transmisión.
- Características de la carga.
- Niveles de transmisión de potencia.
- Límites de capacidad de potencia reactiva de los generadores.
- Características de los aparatos de compensación de reactiva (bancos de condensadores...)[8]

4. TRANSFORMADORES REGULADORES.

El transformador de potencia es uno de los elementos de mayor importancia en la red eléctrica. Debido a la existencia de diferentes requerimientos de niveles de tensión para una gran variedad de usos, es necesaria la transformación de la tensión o corriente de una forma eficiente y fiable. Esta variación se da por ejemplo para convertir la tensión a la salida de un generador en la tensión necesaria en la línea de transmisión.

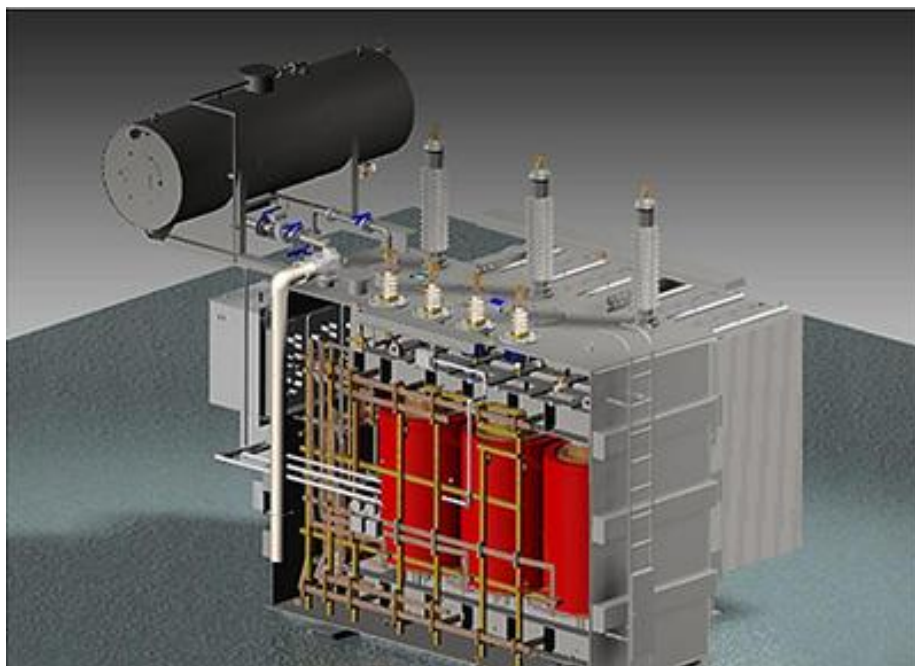


Figura 4.1. Ejemplo transformador de potencia. *Fuente:* [11]

Los transformadores son esenciales en la red eléctrica. Pueden contar con dos o tres devanados de cobre por fase y uno o más núcleos de hierro. A la hora de modelar un transformador, es necesario separar la parte eléctrica de la parte magnética. Sus respectivas reactancias se sacan de un ensayo de cortocircuito para la reactancia de los devanados (debido al flujo de fuga) y de un ensayo de vacío (circuito abierto) para la reactancia del núcleo. La corriente que circula por la rama magnetizante es mucho menor que la corriente de la carga, por ello no se va a tener en cuenta.

$$Y_o = G_o + jB_o \quad (4.1)$$

Donde:

- **Go**: Está relacionada con las pérdidas en el hierro. Se trata de la conductancia. La intensidad que circula por esta rama varía linealmente con la tensión en esa misma rama.
- **Bo**: En este caso la relación entre tensión y corriente está dictada por la característica $rms V - I$, que cuando se encuentra saturada, no es lineal. [6]

Sin embargo, en este trabajo, el análisis se realizara sobre transformadores reguladores, cuyo funcionamiento y objetivos no guarda relación con el transformador de potencia. Los transformadores que se van a analizar tienen la capacidad de regular el flujo de potencia activa y reactiva. Esta regulación se hace por medio de la variación del módulo o del ángulo de la tensión ($\pm 10\%$). Este tipo de transformadores se conocen como **transformadores reguladores**, diseñados para realizar pequeños cambios en el módulo o ángulo de la tensión, en vez de cambios de niveles de tensión. Estos transformadores reguladores son muy importantes en el sistema eléctrico. Las acciones de control de estos transformadores pueden ser tanto manuales como automáticas (con la ayuda de sensores o métodos de realimentación). Hay muchas variantes de estos transformadores reguladores. [12] Hay algunos transformadores reguladores que varían tanto el módulo como el ángulo de la tensión [13].

4.1 TRANSFORMADOR REGULADOR DE MÓDULO.

Uno de los transformadores que se van a analizar en este trabajo es el llamado regulador de módulo de la tensión. En la literatura se le llama **LTC** (*load – tap – changing*) o **ULTC** (*under – load – tap – changing*) que significa transformador con cambio de tomas bajo carga, cuya función es la regulación de módulo de la tensión bajo carga a parte de la facilidad de transformación de los niveles de tensión. Ya que se trabajara en valores en por unidad, aunque el transformador LTC presente esta última característica, no se verá reflejada ya que no es preciso en el análisis de este trabajo. Todos los transformadores tienen la habilidad de cambiar las tomas cuando no hay corriente fluyendo por ellos. En el caso de este tipo de transformadores, los cambios de tomas se pueden realizar cuando el transformador está cargado, es decir, cuando la corriente está fluyendo. [13].

A continuación se muestra el circuito de un transformador regulador del módulo de la tensión (**Figura 4.2**).

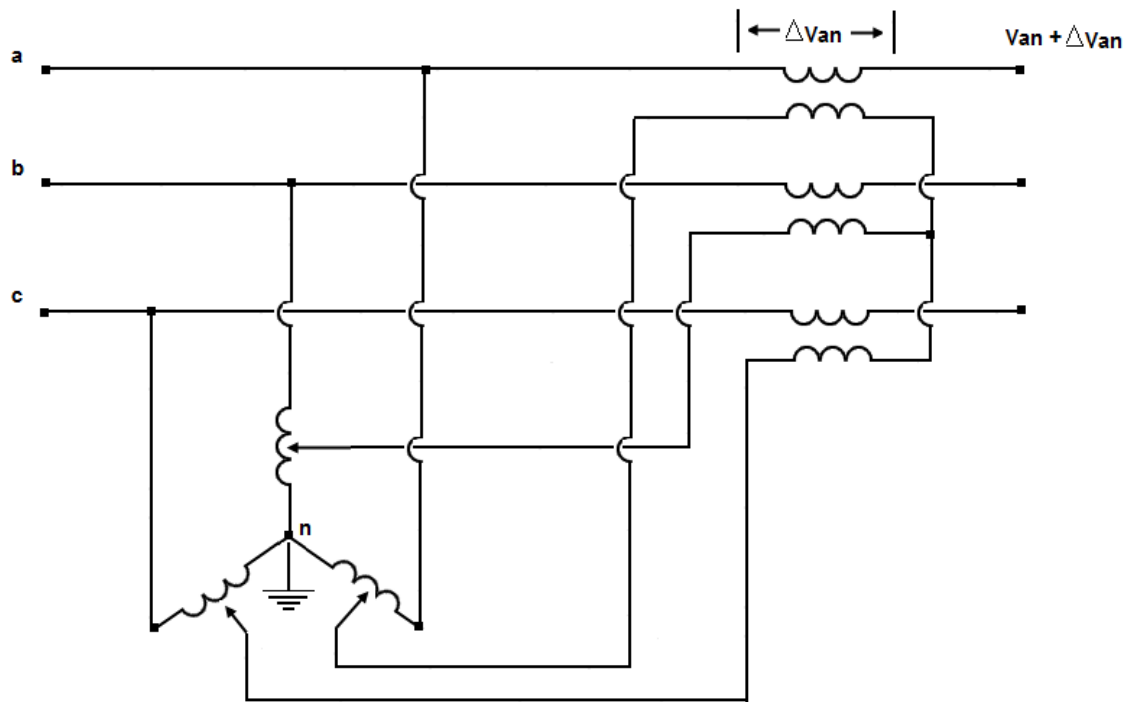


Figura 4.2 Transformador regulador para el control del módulo de la tensión. [13]

4.1.1 Ecuaciones para modelar un transformador LTC. [6]

En el caso de un transformador sin cambio de tomas, en su representación en por unidad, su relación será 1:1 con un circuito equivalente de una admitancia Y_{sc} entre el primario y el secundario. Sin embargo, cuando se tiene un transformador con cambio de tomas o LTC, la representación de este consiste en la conexión en serie de la admitancia de cortocircuito Y_{sc} (representando un transformador en por unidad) con un transformador ideal con una relación $T:1$. En la **Figura 4.3** se muestra dicho circuito. [6]

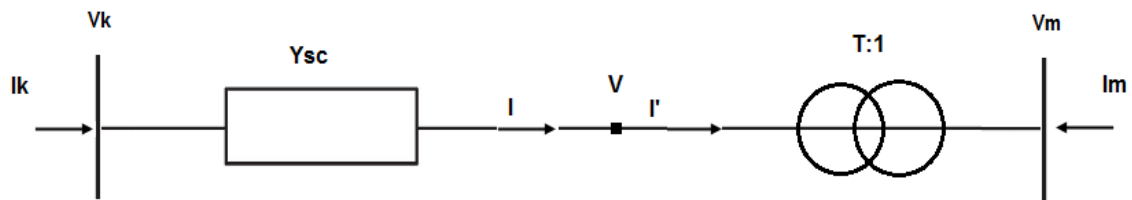


Figura 4.3 Circuito transformador de tomas variables con dos devanados. Fuente [6]

Las ecuaciones que lo representan la figura anterior (**Figura 4.3**) se resumen a continuación. El lado primario está conectado al *nudo k*. El lado secundario está conectado al *nudo m*.

$$\frac{V}{V_m} = \frac{T}{1} \quad (4.2)$$

$$\frac{T}{1} = \frac{I'}{I} \quad (4.3)$$

$$I = Y_{sc}(Vk - V) = Y_{sc}(Vk - TVm) = Ik \quad (4.4)$$

$$I' = TI = Y_{sc}(TVk - T^2Vm) = -Im \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} Ik \\ Im \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{sc} & -TY_{sc} \\ -TY_{sc} & T^2Y_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vk \\ Vm \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Estas ecuaciones (4.2 a 4.6) modelan un transformador LTC de forma simplificada. Para el análisis que se va a realizar en este trabajo, se utilizará este modelo simple de transformador LTC. Las simplificaciones realizadas se resumen a continuación:

1. $Y_o = 0$ No se tiene en cuenta la rama magnetizante.
2. Se trata de un transformador con dos devanados.
3. Posición de tomas nominal para el devanado secundario. El cambio de tomas se realiza sólo en el devanado primario. $T = Tk$
4. La posición de tomas del devanado es simple y no compleja. Para el siguiente tipo de transformador a analizar no será así.
5. Se asume que la admitancia de cortocircuito esta toda en el lado primario.

$$Y_{sc} = Yk \quad (4.7)$$

$$\begin{bmatrix} Ik \\ Im \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Yk & -TkYk \\ -TkYk & Tk^2Yk \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vk \\ Vm \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

La ecuación 4.8 con las siguientes igualdades $Yk = Ykk = Ymm$ y $Yk = -Ykm = -Ymk$ se respresenta en la ecuación 4.9.

$$\begin{bmatrix} Ik \\ Im \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ykk & TkYkm \\ TkYmk & Tk^2Ymm \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vk \\ Vm \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.1.2 Newton Raphson aplicado a flujo de potencia con LTC.

Si la línea consta de un transformador regulador de tipo **LTC**, la expresión en forma matricial para el flujo de potencia mediante el método iterativo de Newton-Raphson es la representada en la ecuación 4.10.

$$\begin{bmatrix} \Delta Pk \\ \Delta Pm \\ \Delta Qk \\ \Delta Qm \end{bmatrix}^{(0)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Pk}{\partial \theta k} & \frac{\partial Pk}{\partial \theta m} & \frac{\partial Pk}{\partial Tk} Tk & \frac{\partial Pk}{\partial Vm} Vm \\ \frac{\partial Pm}{\partial \theta k} & \frac{\partial Pm}{\partial \theta m} & \frac{\partial Pm}{\partial Tk} Tk & \frac{\partial Pm}{\partial Vm} Vm \\ \frac{\partial Qk}{\partial \theta k} & \frac{\partial Qk}{\partial \theta m} & \frac{\partial Qk}{\partial Tk} Tk & \frac{\partial Qk}{\partial Vm} Vm \\ \frac{\partial Qm}{\partial \theta k} & \frac{\partial Qm}{\partial \theta m} & \frac{\partial Qm}{\partial Tk} Tk & \frac{\partial Qm}{\partial Vm} Vm \end{bmatrix}^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta \theta k \\ \Delta \theta m \\ Tk \\ Vm \end{bmatrix}^{(0)} = 0 \quad (4.10)$$

Se aprecia que se ha cambiado la tercera columna de la matriz Jacobiana, ya que en este caso Vk será considerada constante. Es el nudo que se querrá controlar y se le asignará un valor deseado. Será la toma Tk la que cambiará para la regulación de la tensión en ese nudo controlado.

- **Calculo potencias calculadas en LTC.**

En este caso, las potencias calculadas activas y reactivas tendrán una expresión distinta que para las líneas no tenían ningún transformador regulador. Para las potencias que salen del nudo k que será el nudo primario, el nudo controlado:

$$P_{kcal} = Vk^2 G_{kk} + TkVkVm[Gk\cos\theta_{km} + Bk\sin\theta_{km}] \quad (4.11)$$

$$Q_{kcal} = -Vk^2 B_{kk} + TkVkVm[Gk\sin\theta_{km} - Bk\cos\theta_{km}] \quad (4.12)$$

En este caso, la expresión de la potencia en el otro nudo que conecta la línea (*nudo m*), no será igual a la del nudo k . Las potencias que salen del nudo m , que es el secundario son:

$$P_{mcal} = Tk^2Vm^2G_{mm} + TkVkVm[Gm\cos\theta_{mk} + Bm\sin\theta_{mk}] \quad (4.13)$$

$$Q_{mcal} = -Tk^2Vm^2B_{mm} + TkVkVm[Gm\sin\theta_{mk} - Bm\cos\theta_{mk}] \quad (4.14)$$

- **Construcción matriz Jacobiana con LTC:**

Las derivadas parciales de la matriz Jacobiana quedarán de la siguiente forma:

○ Si $k = m$:

$$\frac{\partial P_{kl}}{\partial \theta_{kl}} = -Q_{kcal} - Vk^2 B_{kk} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial P_{kl}}{\partial Tk} Tk = P_{kcal} - Vk^2 G_{kk} \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial Q_{kl}}{\partial \theta_{kl}} = P_{kcal} - Vk^2 G_{kk} \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial Qk l}{\partial Tk l} Tk l = Qkcal + Vk^2 Bkk \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial \theta m l} = -Qmcal - Tk^2 Vm^2 Bmm \quad (4.19)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial Vm l} Vm l = Pmcal + Tk^2 Vm^2 Gmm \quad (4.20)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial \theta m l} = Pmcal - Tk^2 Vm^2 Gmm \quad (4.21)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial Vm l} Vm l = Qmcal - Tk^2 Vm^2 Bmm \quad (4.22)$$

○ Si $k \neq m$:

$$\frac{\partial Pk l}{\partial \theta m l} = Qkcal + Vk^2 Bkk \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial Pk l}{\partial Vm l} Vm l = Pkcal - Vk^2 Gkk \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial Qk l}{\partial \theta m l} = -Pkcal + Vk^2 Gkk \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial Qk l}{\partial Vm l} Vm l = Qkcal + Vk^2 Bkk \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial \theta k l} = Qmcal + Tk^2 Vm^2 Bmm \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial Tk l} Tk l = Pmcal + Tk^2 Vm^2 Gmm \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial \theta k l} = -Pmcal + Tk^2 Vm^2 Gmm \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial Tk l} Tk l = Qmcal - Tk^2 Vm^2 Bmm \quad (4.30)$$

En cada iteración:

$$Tk^{(1)} = Tk^{(0)} + \left(\frac{\Delta Tk}{Tk} \right)^{(1)} Tk^{(0)} \quad (4.31)$$

- **Nudo PVT:**

Al introducir un transformador LTC en una línea del sistema, este controlará la tensión en un nudo. Ese nudo se llamará PVT y sus características son parecidas al nudo de tipo PV. La diferencia es que está controlado por un transformador y no por un generador síncrono. La variable Tk será una variable de estado a calcular en el programa. Si los límites de Tk no son sobrepasados, el nudo seguirá siendo un nudo PVT. Si los límites se sobrepasan, la situación será parecida a un nudo PV, es decir, el nudo dejará de ser PVT, y pasará a ser un nudo PQ. La variable Tk pasará a tener un valor fijo en su límite superior o inferior. Esto significará que el módulo de la tensión no estará en el valor especificado en un principio. En el caso de que el límite de la toma sea violado, la variable del módulo de la tensión varía y pasará a ser variable de estado. Esto significa que el transformador de tomas variables pasará a ser un transformador normal y las ecuaciones 4.10 cambiarán a la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta Pk \\ \Delta Pm \\ \Delta Qk \\ \Delta Qm \end{bmatrix}^{(0)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Pk}{\partial \theta k} & \frac{\partial Pk}{\partial \theta m} & \frac{\partial Pk}{\partial Vk} V_k & \frac{\partial Pk}{\partial Vm} V_m \\ \frac{\partial Pm}{\partial \theta k} & \frac{\partial Pm}{\partial \theta m} & \frac{\partial Pm}{\partial Vk} V_k & \frac{\partial Pm}{\partial Vm} V_m \\ \frac{\partial Qk}{\partial \theta k} & \frac{\partial Qk}{\partial \theta m} & \frac{\partial Qk}{\partial Vk} V_k & \frac{\partial Qk}{\partial Vm} V_m \\ \frac{\partial Qm}{\partial \theta k} & \frac{\partial Qm}{\partial \theta m} & \frac{\partial Qm}{\partial Vk} V_k & \frac{\partial Qm}{\partial Vm} V_m \end{bmatrix}^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta \theta k \\ \Delta \theta m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \end{bmatrix}^{(0)} = 0 \quad (4.32)$$

4.2. TRANSFORMADOR REGULADOR DE FASE.

El transformador regulador de fase o regulador de ángulo tiene muchas diferencias y otro objetivo diferente del transformador de variación del módulo de la tensión. En este trabajo el transformador regulador de este tipo que se va a estudiar se conoce con las siglas **PS (Phase – shifting)**. Su objetivo es desfazar el ángulo de la tensión en una barra para regular el flujo de potencia activa, a diferencia del transformador de LTC cuyo objetivo es regular el módulo de la tensión en una barra para disminuir el flujo de potencia reactiva por el sistema y por lo tanto mejorar el nivel de tensión en dicha barra. [1]

A continuación se muestra el circuito de un transformador con regulación del ángulo de la fase de la tensión (**Figura 4.4**).

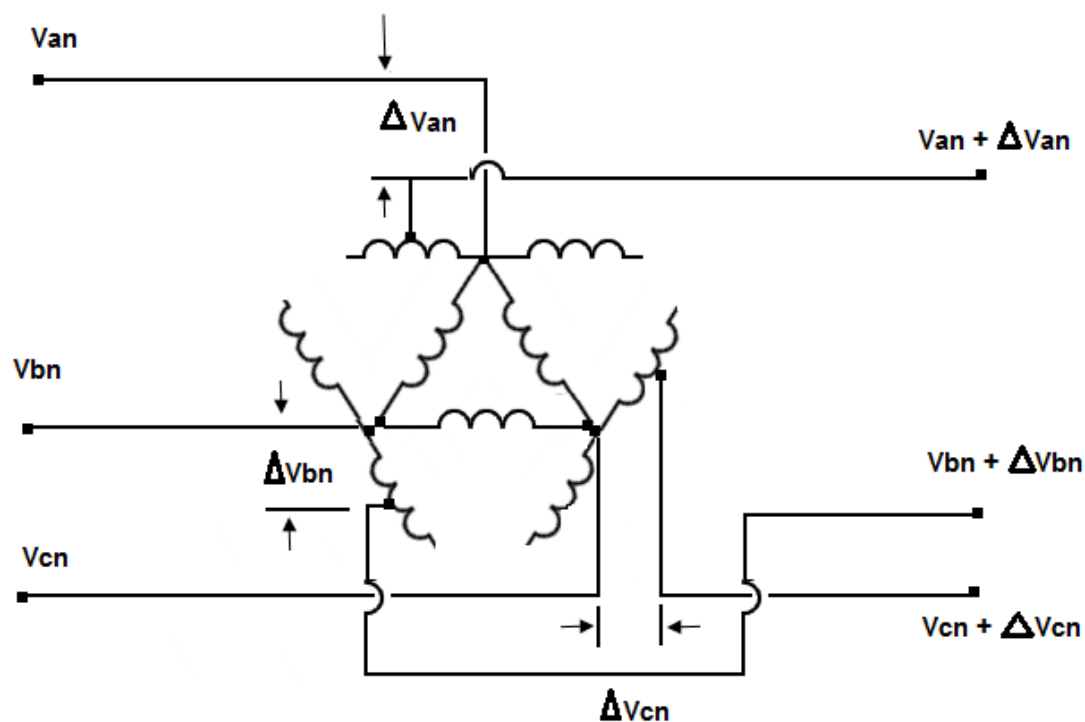


Figura 4.4 Transformador regulador para el control de la fase de la tensión.[13]

4.2.1 Ecuaciones para modelar un transformador PS. [6]

En primer lugar se muestra en la **Figura 4.5**, el circuito equivalente del transformador PS estudiado en este trabajo entre un *nudo* k primario y un *nudo* m secundario. Este transformador regulador de ángulo no puede reproducirse sin acoplamiento.

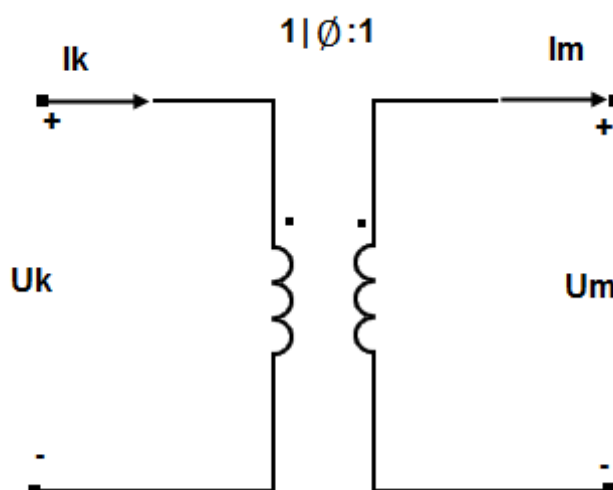


Figura 4.5. Circuito monofásico del transformador con regulación del ángulo de tensión.

Fuente:[1]

La ecuación 4.6 obtenida en el apartado anterior del transformador LTC regulador del módulo servirá para obtener las ecuaciones del transformador PS de dos devanados en una línea que irá desde el *nudo k* primario hasta el *nudo m* secundario. Sobre dicha ecuación se harán una serie de modificaciones para que el modelado en el programa Matlab© sea lo más sencillo posible y represente el comportamiento del transformador PS. Estas están enumeradas a continuación.

1. La relación de transformación es un número complejo: $T = 1|\phi = \cos\phi + j\sin\phi$ con magnitud unidad.
2. Las admitancias se combinan de la siguiente forma:

$$Y_{sc} = Y = \frac{Y_{sc p} Y_{sc s}}{Y_{sc p} + Y_{sc s}} \quad (4.33)$$

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & -Y(\cos\phi + j\sin\phi) \\ -Y(\cos\phi + j\sin\phi) & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Se han tenido en cuenta las simplificaciones realizadas para la ecuación 4.6 del comportamiento del transformador PS. La rama magnetizante se considera despreciable. La facilidad de cambio de fase solo es posible en el devanado primario. Otra representación de la ecuación 4.34 es la representada en la ecuación 4.35.

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & Y_{km} \\ Y_{mk} & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Donde:

$$Y_{kk} = G_{kk} + jB_{kk} = Y = G + jB \quad (4.36)$$

$$Y_{mm} = G_{mm} + jB_{mm} = Y \quad (4.37)$$

$$Y_{km} = G_{km} + jB_{km} = -Y(\cos\phi + j\sin\phi) \quad (4.38)$$

$$Y_{mk} = G_{mk} + jB_{mk} = -Y(\cos\phi + j\sin\phi) \quad (4.39)$$

4.2.2 Newton-Raphson aplicado a flujo de potencia con PS. [6]

Como se puede apreciar en las ecuaciones anteriores, se tiene una variable de estado más que será ϕ . Como la regulación de la fase del ángulo modifica el flujo de potencia activa, se introducirá P_{km}^ϕ ya que la regulación se hace en el lado primario, es decir, el lado k . La ecuación del flujo de potencia en forma matricial quedará de la forma representada en la ecuación 4.40.

$$\begin{bmatrix} \Delta Pk \\ \Delta Pm \\ \Delta Qk \\ \Delta Qm \\ \Delta Pkm^\phi \end{bmatrix}^{(0)} + \begin{bmatrix} \frac{\partial Pk}{\partial \theta k} & \frac{\partial Pk}{\partial \theta m} & \frac{\partial Pk}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Pk}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Pk}{\partial \phi} \\ \frac{\partial Pm}{\partial \theta k} & \frac{\partial Pm}{\partial \theta m} & \frac{\partial Pm}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Pm}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Pm}{\partial \phi} \\ \frac{\partial Qk}{\partial \theta k} & \frac{\partial Qk}{\partial \theta m} & \frac{\partial Qk}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Qk}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Qk}{\partial \phi} \\ \frac{\partial Qm}{\partial \theta k} & \frac{\partial Qm}{\partial \theta m} & \frac{\partial Qm}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Qm}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Qm}{\partial \phi} \\ \frac{\partial Pkm^\phi}{\partial \theta k} & \frac{\partial Pkm^\phi}{\partial \theta m} & \frac{\partial Pkm^\phi}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Pkm^\phi}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Pkm^\phi}{\partial \phi} \end{bmatrix}^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta \theta k \\ \Delta \theta m \\ \Delta V_k \\ V_k \\ \Delta V_m \\ V_m \\ \Delta \phi \end{bmatrix}^{(0)} = 0 \quad (4.40)$$

- **Calculo de potencias calculadas en PS.**

Las potencias calculadas activas y reactivas tendrán una expresión distinta que para las líneas del LTC. Para la potencia que sale del *nudo k* que será el nudo primario y para las que salen del *nudo m* o nudo secundario serán las representadas en las ecuaciones 4.41 a 4.44. Cabe destacar que se han sustituido ya las ecuaciones 4.36 a 4.39 en dichas ecuaciones.

$$P_{kcal} = V_k^2 G - V_k V_m [G \cos(\theta_{km} - \phi) + B \sin(\theta_{km} - \phi)] \quad (4.41)$$

$$Q_{kcal} = -V_k^2 B - V_k V_m [G \sin(\theta_{km} - \phi) - B \cos(\theta_{km} - \phi)] \quad (4.42)$$

$$P_{mcal} = V_m^2 G - V_k V_m [G \cos(\theta_{mk} + \phi) + B \sin(\theta_{mk} + \phi)] \quad (4.43)$$

$$Q_{mcal} = -V_m^2 B - V_k V_m [G \sin(\theta_{mk} + \phi) - B \cos(\theta_{mk} + \phi)] \quad (4.44)$$

En este caso, al tratarse de un transformador regulador de la fase de la tensión la toma ϕ tendrá un límite máximo y mínimo de trabajo.

$$\phi_{min} < \phi < \phi_{max} \quad (4.45)$$

- **Construcción de la matriz Jacobiana con PS:**

Los elementos de la matriz Jacobiana serán:

- Si $k = m$:

$$\frac{\partial P_{kl}}{\partial \theta_{kl}} = -Q_{kcal} - V_k^2 B \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial P_{kl}}{\partial V_k} V_k = P_{kcal} + V_k^2 G \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial Q_{kl}}{\partial \theta_{kl}} = P_{kcal} - V_k^2 G \quad (4.48)$$

$$\frac{\partial Qk l}{\partial V k l} V k l = Qkcal - V k^2 B \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial \theta m l} = -Qmcal - V m^2 B \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial V m l} V m l = Pmcal + V m^2 G \quad (4.51)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial \theta m l} = Pmcal - V m^2 G \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial V m l} V m l = Qmcal - V m^2 B \quad (4.53)$$

- Si $k \neq m$:

$$\frac{\partial Pk l}{\partial \theta m l} = Qkcal + V k^2 B \quad (4.54)$$

$$\frac{\partial Pk l}{\partial V m l} V m l = Pkcal - V k^2 G \quad (4.55)$$

$$\frac{\partial Qk l}{\partial \theta m l} = -Pkcal + V k^2 G \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial Qk l}{\partial V m l} V m l = Qkcal + V k^2 B \quad (4.57)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial \theta k l} = Qmcal + V m^2 B \quad (4.58)$$

$$\frac{\partial Pm l}{\partial V k l} V k l = Pmcal - V m^2 G \quad (4.59)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial \theta k l} = -Pmcal + V m^2 G \quad (4.60)$$

$$\frac{\partial Qm l}{\partial V k l} V k l = Qmcal + V m^2 B \quad (4.61)$$

- Los nuevos términos introducidos:

$$\frac{\partial Pk l}{\partial \emptyset l} = Qkcal + V k^2 B \quad (4.62)$$

$$\frac{\partial Q_k l}{\partial \emptyset l} = -P_{kcal} + V_k^2 G \quad (4.63)$$

$$\frac{\partial P_m l}{\partial \emptyset l} = -Q_{mcal} - V_m^2 B \quad (4.64)$$

$$\frac{\partial Q_m l}{\partial \emptyset l} = P_{mcal} - V_m^2 G \quad (4.65)$$

Como $P_{km}^\emptyset = P_k$, los términos derivativos de la Jacobiana de P_{km}^\emptyset serán iguales que los de P_k .

$$\frac{\partial P_k l}{\partial \theta_k l} = \frac{P_{km}^\emptyset}{\partial \theta_k l} ; \frac{\partial P_k l}{\partial \theta_m l} = \frac{P_{km}^\emptyset}{\partial \theta_m l} ; \frac{\partial P_k l}{\partial V_k l} V_k = \frac{P_{km}^\emptyset}{\partial V_k l} V_k$$

$$\frac{\partial P_k l}{\partial \emptyset l} = \frac{P_{km}^\emptyset}{\partial \emptyset l} ; \frac{\partial P_k l}{\partial V_m l} V_m = \frac{P_{km}^\emptyset}{\partial V_m l} V_m \quad (4.66)$$

La actualización en cada iteración será:

$$\emptyset^{(i)} = \emptyset^{(i-1)} + \Delta \emptyset^{(i)} \quad (4.67)$$

Desde la iteración primera se revisa que no se haya superado el límite de la fase. Si se supera se fija en el límite violado, la potencia activa por la rama puede variar y \emptyset ya no será una variable de estado.

5. CASOS DE ESTUDIO.

En este capítulo se tratará de explicar los respectivos flujos de potencia que se van a llevar a cabo en este trabajo. En primer lugar se realizará un flujo de potencia sobre un sistema dado cuando no hay ningún transformador de regulación. En segundo lugar, se incluirá un transformador regulador de módulo de la tensión (LTC) para controlar la tensión en un nudo de dicho sistema y se verá si es capaz de regular dicho módulo. Por último, se incluirá un transformador regulador de fase de la tensión (PS) para la regulación de la potencia activa en una de las líneas del sistema analizado. Estos tres estudios serán únicos y considerados casos base. También en cada flujo de potencia realizado se explicarán brevemente las funciones de programación utilizadas en el programa Matlab© así como el proceso iterativo del modelo.

5.1. FLUJO DE POTENCIA SIN NINGUN TRANSFORMADOR REGULADOR.

En primer lugar se realizará un algoritmo en Matlab© de una red determinada para resolver el flujo de potencia. En este primer caso, no se incluirá en el análisis ningún tipo de transformador regulador. Sin embargo, este sistema contará con tres transformadores de potencia con tomas fijas. Dado que se está trabajando en valores en por unidad, el transformador de potencia será tratado como una línea más con una impedancia. El método para resolver el flujo de potencia es el descrito en apartados anteriores, Newton-Raphson. El sistema a evaluar es el mostrado en la **Figura 5.1**.

5.1.1 Datos del sistema a analizar.[14]

A continuación se tienen las siguientes tablas con los datos del sistema a analizar.

Tabla 5.1. Datos de los nudos del sistema.

NUDO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
TIPO	Oscilante	PV	PV	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ	PQ
TENSIÓN (pu)	1.04 0°	1.025	1.025	---	---	---	---	---	---

Tabla 5.2. Datos de los generadores del sistema.

GENERADOR	1	2	3
NUDO	1	2	3
POTENCIA ACTIVA GENERADA (pu)	---	1.63	0.85
LIMITES REACTIVA (pu)	±5	±3	±3

Tabla 5.3. Datos de las líneas del sistema.

LINEAS	1*	2	3	4	5	6*	7	8	9*
NUDO INICIO	1	4	4	6	5	2	7	9	3
NUDO FINAL	4	6	5	9	7	7	8	8	9
RESISTENCIA (pu)	0	0.017	0.01	0.039	0.032	0	0.0085	0.0119	0
REACTANCIA (pu)	0.0576	0.092	0.085	0.17	0.161	0.0625	0.072	0.1008	0.0586
SUSCEPTANCIA derivador (pu)	0	0.079	0.088	0.179	0.153	0	0.0745	0.1045	0

* Se trata de transformadores de potencia con solo reactancia.

Tabla 5.4. Datos de las cargas del sistema.

CARGAS	1	2	3
NUDO	5	6	8
POTENCIA ACTIVA (pu)	1.25	0.9	1
POTENCIA REACTIVA (pu)	0.5	0.3	0.35

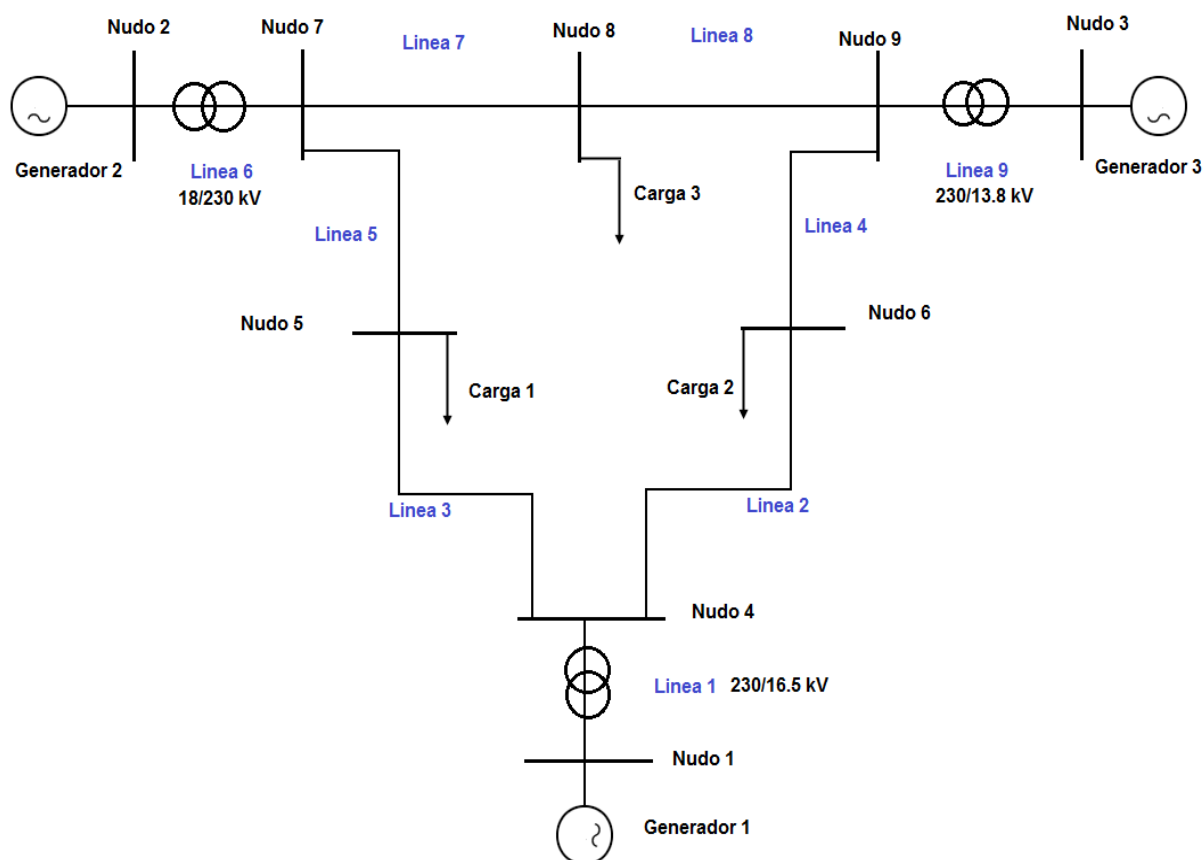


Figura 5.1 Ejemplo de sistema de 9 nudos y 3 generadores con 3 cargas para el análisis. Fuente: [14]

Al realizar el algoritmo para llevar a cabo la solución en el programa Matlab®, se tratarán todas las variables en el sistema de por unidad. Sin embargo, cabe mencionar los valores base del sistema. Para todo el sistema la potencia de base será la misma $S_{base} = 100 \text{ MVA}$. En cuanto a la tensión de base, al tener tres transformadores de potencia habrá cuatro zonas:

- $U_{base1} = 16.5 \text{ kV}$. Zona del nudo 1.
- $U_{base2} = 18 \text{ kV}$. Zona del nudo 2.
- $U_{base3} = 13.8 \text{ kV}$. Zona del nudo 3.
- $U_{base4} = 230 \text{ kV}$. Zona central con el resto de nudos.

5.1.2 Diagrama de flujo. Figura 5.2.

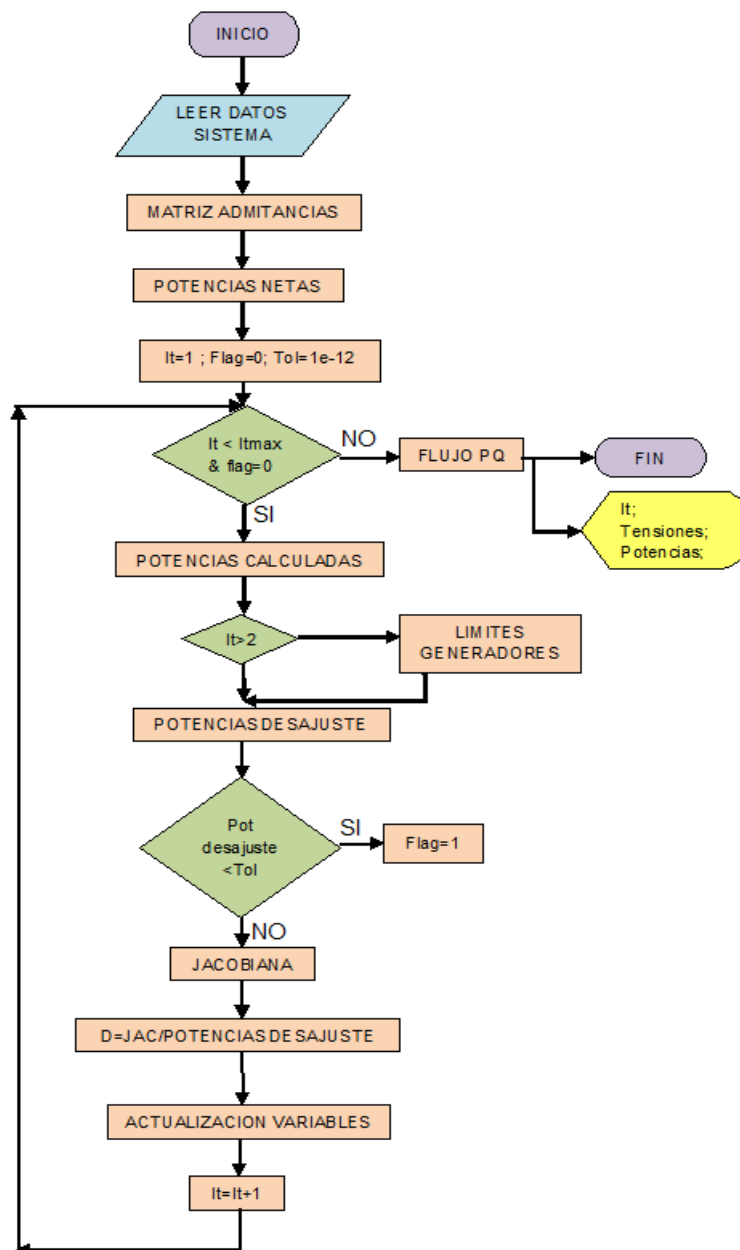


Figura 5.2. Diagrama de flujo del algoritmo del flujo de potencia sin transformador regulador.

5.1.3 Algoritmo en Matlab.

Para llevar a cabo el flujo de potencia en Matlab© serán necesarias las siguientes funciones.

ProgramaPrincipal:

- 1. Lectura de datos del sistema: *DatosFlujoPotencia***
- 2. Función: *Ybus***
- 3. Función: *NewtonRaphson***
 - 3.1 *PotenciasNetas***
 - 3.2 *PotenciasCalculadas***
 - 3.3 *LimiteGeneradores***
 - 3.4 *PotenciasDesajuste***
 - 3.5 *Jacobiana***
 - 3.6 *ActualizacionVariablesEstado***
- 4. Función: *FlujoPQ***

- **FUNCIÓN MAIN. ProgramaPrincipal.**

Esta será la función principal, desde la cual se llamarán a las correspondientes funciones del programa para resolver el flujo de potencia del sistema. La primera función llamada será la necesaria para guardar los datos conocidos correspondientes a nuestro sistema, DatosFlujoPotencia.

- 1. Función para datos del sistema: DatosFlujoPotencia.**

Esta es la primera función que se va a definir en Matlab©, en la cual se introducirán los valores conocidos del sistema. Estos valores son los definidos anteriormente en el apartado *Datos del sistema*. Serán los únicos valores numéricos del algoritmo y por ello estarán en otro archivo *.m* y no en la función main ProgramaPrincipal

- 2. Función para la matriz de admitancias: YBus.**

Los transformadores de las líneas 1, 6 y 9 serán tratados como una línea más ya que se está trabajando en por unidad y en este caso sólo tendrán reactancia. Por ello, se incluirán en la matriz de admitancias de la misma forma que si se tratasen de líneas normales. En el algoritmo realizado, se han separado los términos de conductancia y susceptancia de la admitancia, y se han realizado dos matrices de admitancias. Una para cada uno para una mayor sencillez en el código.

La siguiente función a llamar en el programa principal será la llamada NewtonRaphson para llevar a cabo el proceso de iteración en la solución del problema

de flujo de potencia. Dentro de esta función, se llamarán sucesivas subfunciones para ir calculando distintos parámetros necesarios para la realización de las iteraciones.

3. Función para llevar a cabo la iteración (Newton Raphson):

NewtonRaphson

Constará de las siguientes subfunciones dentro de ella:

- PotenciasNetas.
- PotenciasCalculadas.
- LimiteGeneradores.
- PotenciasDesajuste.
- Jacobiana.
- ActualizacionVariablesEstado.

3.1 Función para el cálculo de potencias netas. PotenciasNetas

En esta primera subfunción dentro de la función del método iterativo NewtonRaphson, se calcularán dos matrices. Una matriz para las potencias activas netas y otra para las reactivas netas en cada nudo. Se hace un balance de potencias en cada nudo. Se resta la potencia de la carga consumida a la potencia generada si la hay en dicho nudo según las ecuaciones **2.40** y **2.41** para P_{knet} .

Así obtenemos dos matrices de una fila y 9 columnas, debido a que hay 9 nudos. Cabe destacar que esta función calcula valores que son constantes, es decir, aunque están dentro de la función de NewtonRaphson, no entra dentro del bucle iterativo. Puede variar si los límites de potencia reactiva generada por los generadores son superados.

3.2 Función para el cálculo de potencias calculadas. PotenciasCalculadas

En esta segunda función dentro de la función NewtonRaphson, ya se empezará con las iteraciones, es decir, esta es la primera función situada dentro del bucle. En ella se calcularán las potencias calculadas de forma iterativa hasta que la solución converja. Se crearán dos matrices de una fila y nueve columnas (que es el número nudos). Las potencias calculadas se hallarán con las fórmulas mencionadas anteriormente **2.48** y **2.49** al explicar el método iterativo de Newton Raphson por una línea. Por medio de dos bucles se irán hallando las sumas de las potencias de las líneas que llegan a cada nudo.

La potencia activa y reactiva por las líneas de los transformadores se calculará de la misma forma que si fuese una línea normal.

3.3 Función para el cálculo de límites de generadores. LímiteGeneradores.

Estará dentro del bucle iterativo ya que habrá que comprobar en cada iteración si los generadores están dentro de su límite máximo de generación de potencia reactiva. La comprobación se hará a partir de la segunda iteración ya que en un primer momento los valores serán muy poco precisos.

Si la potencia reactiva calculada en dicho nudo PV de generación está fuera de los límites, se asignará el valor límite a la potencia reactiva neta en ese nudo, y el nudo pasará a ser nudo PQ de generación. Además si en ese mismo nudo hubiese una carga, a la potencia reactiva neta del nudo se le restaría la potencia reactiva absorbida por ella.

3.4 Función para el cálculo de potencias de desajuste. PotenciasDesajuste

Esta es la siguiente subfunción dentro del bucle iterativo. Se trata de calcular las llamadas potencias de desajuste de las ecuaciones 2.40 y 2.41.

Se hallarán los términos de la matriz de desajuste. Luego se comprobará que la solución converja. Si los términos son menores que la tolerancia definida (*cercana a cero o $1e - 12$*), la solución convergerá y ya se tendrá el valor de los resultados definitivos. Mediante el término Flag, se saldrá del bucle de la función NewtonRaphson.

Será necesario, como ya se ha mencionado antes, que los términos de la matriz de desajuste de potencia activa y reactiva correspondiente al nudo oscilante sean cero. También el término de potencia reactiva en un nudo PV ha de ser cero. Si no converge, el bucle continuará con la siguiente función a la descrita a continuación.

3.5 Función para el cálculo de la matriz Jacobiana. Jacobiana.

A continuación, la siguiente función dentro del bucle para la iteración, será la construcción de la matriz Jacobiana. Por medio de dos bucles se irá rellenando la matriz Jacobiana que será necesaria para la posterior actualización de las variables de estado.

Después de la función Jacobiana y antes de ActualizacionVariablesEstado es necesario realizar una operación. Esta operación está dentro de la función NewtonRaphson y dentro del bucle iterativo.

$$D = JAC \backslash DPQ' \quad (5.1)$$

Consiste en hallar la matriz **D**, que será resultado de la división de la matriz Jacobiana calculada en la función anterior entre la matriz de desajuste de potencias activa y reactiva. La última matriz será tratada de forma traspuesta ya que si no la división no es posible.

3.6 Función para la actualización de las variables de estado.

ActualizacionVariablesEstado.

Esta es la última función dentro del bucle de iteración de la función NewtonRaphson. Se actualizarán las variables de estado de acuerdo a la ecuación 2.37.

Tras actualizar las variables de estado, se comenzará con la siguiente iteración. Se volverán a calcular las potencias calculadas con los nuevos valores de las variables de estado (módulo y fase de las tensiones), también las potencias de desajuste, se volverá a comprobar la convergencia y si no se da, se volverá a calcular la Jacobiana y a actualizar las variables de estado y así sucesivamente hasta que las potencias de desajuste sean menores que la tolerancia ($1e - 12$).

Ya se han descrito todas las funciones dentro de la función NewtonRaphson. A su vez esta función irá dentro de la función principal. Esta función devolverá los valores del módulo de la tensión y el argumento en cada nudo. También devolverá el número de iteraciones que ha sido necesario para llegar a la convergencia de la solución.

Por último, en la función principal, tras la llamada de la función NewtonRaphson, será necesario realizar una función para calcular la potencia enviada y recibida en cada nudo.

4. Función para el cálculo del flujo de potencias: FlujoPQ.

Esta última función sirve para calcular la potencia activa y reactiva enviada y recibida en cada línea del sistema estudiado. También se calcularán las pérdidas de las líneas y el flujo de potencia en cada nudo. Estas potencias se calcularán una vez obtenidos los módulos y argumentos de las tensiones en todos los nudos del sistema. Dado que las potencias están calculadas saliendo de los nudos, si su signo es negativo, es que el flujo de potencia entra en el nudo que sea.

Ya se tienen todas las funciones en ProgramaPrincipal que es como se llama la función principal de este flujo de potencia desde las que se van llamando las funciones para ir calculando los datos.

5.1.4 Soluciones del sistema. Caso base.

En primer lugar, el número de iteraciones necesario para llegar a la solución se ve reflejado en la **Tabla 5.5**.

Tabla 5.5. Número iteraciones para la convergencia en flujo de potencia sin transformador regulador.

Iteraciones	6
-------------	---

A continuación se muestran los resultados de las tensiones en módulo y argumento de los nudos del sistema estudiado (**Tabla 5.6**).

Tabla 5.6. Resultados tensiones del flujo de potencia sin transformador regulador en el sistema.

NUDO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VM (pu)	1.04	1.025	1.025	1.0258	0.9956	1.0127	1.0258	1.0159	1.0324
VA (grados)	0	9.28	4.6648	-2.2168	-3.9888	-3.6874	3.7197	0.7275	1.9667

Como se puede apreciar en la tabla anterior, los valores de las tensiones están dentro del rango adecuado que suele ser de 0.95 a 1.05 en por unidad.

En la **Tabla 5.7** se muestran las potencias complejas enviadas y recibidas en cada línea del sistema estudiado.

Tabla 5.7 Flujos de potencias en por unidad por las líneas para el caso sin transformador regulador.

Numero línea	Nudo inicio	Nudo final	P enviada	Q enviada	P recibida	Q recibida	Perdidas Activa (pu)
1	1	4	0.7164	0.2705	-0.7164	- 0.2392	0.0000
2	4	6	0.3070	0.0103	-0.3054	- 0.1654	0.0017
3	4	5	0.4094	0.2289	-0.4068	- 0.3869	0.0026
4	6	9	-0.5946	- 0.1346	0.6082	- 0.1807	0.0135
5	5	7	-0.8432	-0.1131	0.8662	- 0.0838	0.0230
6	2	7	1.63	0.0665	-1.63	0.0918	0.0000
7	7	8	0.7638	-0.008	-0.759	- 0.1070	0.0048
8	9	8	0.2418	0.0312	-0.241	-0.243	0.0009
9	3	9	0.85	-0.1086	-0.85	0.1496	0.0000

A continuación se muestra en la **Figura 5.3** el sistema con el flujo de potencias activas y reactivas de forma gráfica.

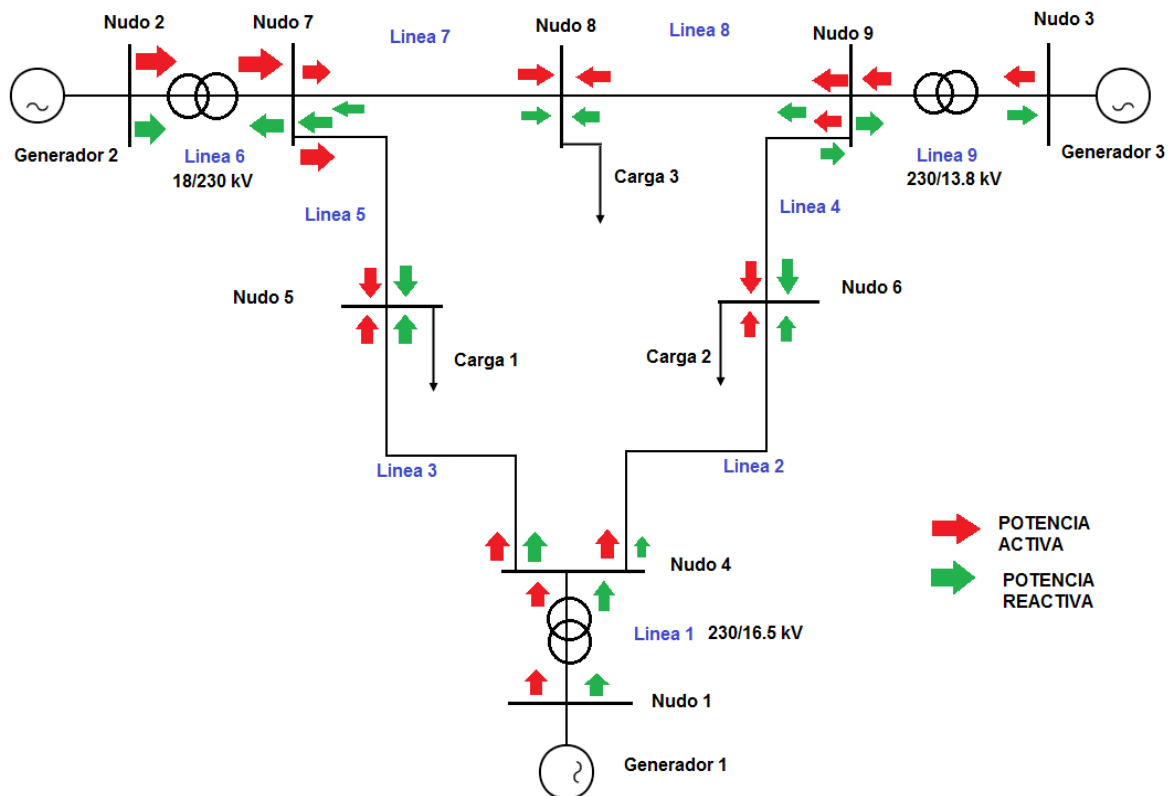


Figura 5.3. Representación del flujo de potencia por el sistema estudiado.

Se concluye lo siguiente:

- El generador 1 y 2 ceden potencia reactiva. El generador 3 la absorbe.
- Los tres transformadores absorben potencia reactiva.
- Las líneas 2,3,4,5,7 y 8 ceden potencia reactiva al sistema. Tienen una carga pequeña.

La **Tabla 5.8** siguiente muestra las pérdidas totales de potencia activa en todas las líneas.

Tabla 5.8 Pérdidas totales potencia activa en por unidad del sistema.

Pérdidas totales Pactiva(pu)	0.0464
-------------------------------------	---------------

A continuación, se introducirá un transformador regulador para llevar a cabo el control de la tensión en un determinado nudo. Se realizará un flujo de potencia como el realizado anteriormente pero introduciendo en una línea un transformador regulador. Primero se introducirá un transformador regulador **LTC** y después un **PS** para analizar su comportamiento en este sistema.

5.2 FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR LTC.

El nudo que se va a controlar con el transformador LTC será el nudo 5 ya que tiene el menor módulo de la tensión. El objetivo es aumentar esa tensión a un valor de $1 pu$ para ver como influye en los valores.

5.2.1 Datos del transformador LTC.

El sistema sufrirá un cambio en unas líneas para poder introducir el transformador.

- En primer lugar, se introducirá un nuevo nudo (10) que será de tipo PQ.
- La anterior línea que iba del nudo 5 al 7 (línea 5), ahora unirá el nudo 10 y 7.
- Estos cambios se deben a que el transformador LTC se incorporará del nudo 5 al 10. Siendo el lado primario el del nudo 5, que será el controlado.

El sistema quedará como está representado en la **Figura 5.4**.

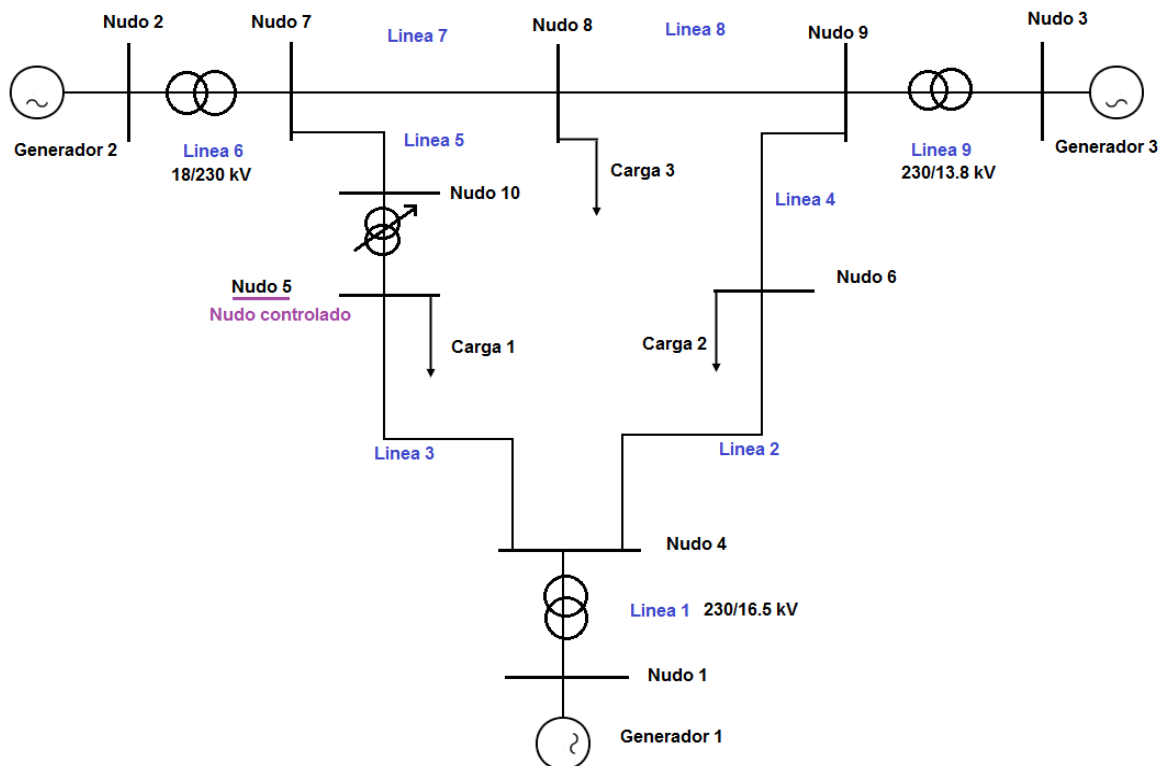


Figura 5.4. Sistema a estudiar con la inclusión del transformador regulador del módulo de la tensión que controla el nudo 5.

En la **Tabla 5.9** se muestran los datos del transformador regulador de módulo introducido.

Tabla 5.9. Datos del transformador regulador de módulo de la tensión.

TRANSFORMADOR LTC	
NUDO INICIO	5
NUDO FINAL	10
RESISTENCIA (pu)	0
REACTANCIA (pu)	0.1
Límites de tomas	0.5-1.5
NUDO CONTROLADO	5
VALOR TENSION (pu) REQUERIDO	1.0

5.2.2 Diagrama de flujo. LTC. Figura 5.5.

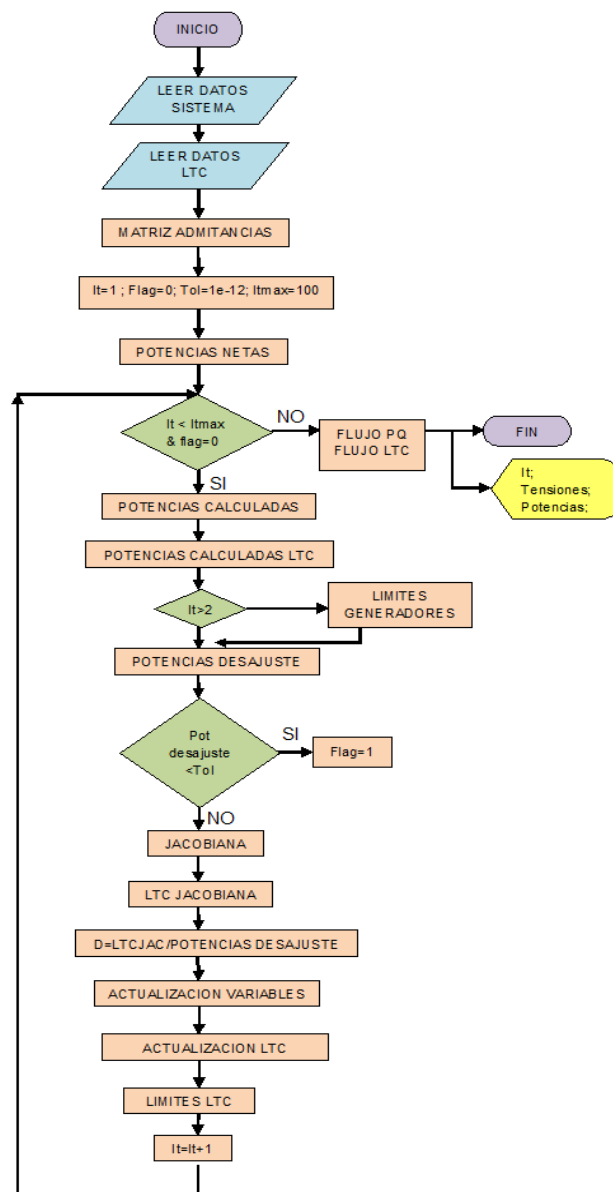


Figura 5.5. Diagrama de flujo del algoritmo del flujo de potencia del sistema con un transformador regulador LTC.

5.2.3 Algoritmo en Matlab: LTC.

A continuación, se implementará el modelo del transformador regulador de módulo de la tensión en una de las líneas del sistema anterior. Habrá unas funciones que coincidan con el modelado anterior y otras que no. Las funciones que coinciden en el programa principal serán:

- DatosFlujoPotencia
- YBus
- FlujoPQ

Por otro lado otras funciones serán sustituidas en la función principal.

- NewtonRaphson será sustituida por LTCNewtonRaphson.

Y otras serán añadidas en la función principal:

- LTCDatosFlujoPotencia: Datos del transformador LTC.
- LTCFlujoPQ: Cálculo del flujo de potencias activas y reactivas por la línea del transformador LTC.

A su vez la función LTCNewtonRaphson tendrá en su interior funciones que se mantendrán constantes de la anterior función NewtonRaphson. Estas serán:

- PotenciasNetas
- PotenciasCalculadas
- LimiteGeneradores
- PotenciasDesajuste
- Jacobiana
- ActualizacionVariablesEstado

Pero, dentro de la misma, se añadirán otras cuatro funciones para representar el funcionamiento del LTC. Serán:

- LTCPotenciasCalculadas
- LTCActualizaciones
- LTCLimites
- LTCJacobiana

ProgramaPrincipal:

- 1. Lectura de datos del sistema: DatosFlujoPotencia**
- 2. Lectura datos del transformador LTC: LTCDatosFlujoPotencia**
- 3. Función: Ybus**
- 4. Función: LTCNewtonRaphson**
 - 4.1 PotenciasNetas**
 - 4.2 PotenciasCalculadas**
 - 4.3 LTCPotenciasCalculadas**
 - 4.4 LimiteGeneradores**
 - 4.5 PotenciasDesajuste**
 - 4.6 Jacobiana**
 - 4.7 LTCJacobiana**
 - 4.8 ActualizacionVariablesEstado**
 - 4.9 LTCActualizaciones**
 - 4.10 LTCLimites**
- 5. Función: FlujoPQ**
- 6. Función: LTCFlujoPQ**

- **FUNCION MAIN: ProgramaPrincipal**

Como ya se sabe, desde esta función principal, se llamarán todas las funciones para resolver el flujo de potencia con el transformador LTC.

1. DatosFlujoPotencia.

La primera función a llamar será casi idéntica que en el caso anterior de flujo de potencia sin transformador. Sufrirá los cambios mencionados anteriormente para poder introducir el transformador LTC en las líneas. Quedará como se representa en la **Figura 5.4.**

2. LTCDatosFlujoPotencia.

Esta será la segunda función llamada desde la función principal. Esta función será construida en este modelo ya que en el anterior no existía. Se tratará de una función para guardar los datos correspondientes al transformador LTC.

3. YBus.

Esta es la tercera función llamada desde la función principal. Esta función no varía, ya que se construye a partir de los datos de las dos funciones anteriores.

Además, la matriz de admitancias que se construye con bucles, tiene siempre la misma forma de construirse. Como el bucle se ha ido haciendo en función de variables definidas en las funciones anteriores, no es necesario cambiar nada en ella. Las matrices que devolverá serán dos, la *YR* de las conductancias y la *YI* de las susceptancias. Sus dimensiones serán de 10x10 debido a que se tienen 10 nudos en este caso. En esta función no se tendrán en cuenta las líneas con transformadores reguladores, solo las de transmisión y las de transformadores de potencia.

4. LTCNewtonRaphson.

Esta función es la siguiente en la lista a llamar. Es diferente de la del programa anterior por lo cual se describirá paso a paso. Habrá funciones iguales que en el programa anterior y otras diferentes. Las funciones dentro de esta nueva función serán:

- PotenciasNetas.
- PotenciasCalculadas.
- LTCPotenciasCalculadas.
- LimiteGeneradores
- PotenciasDesajuste.
- Jacobiana.
- LTCJacobiana.
- ActualizacionVariablesEstado
- LTCActualizaciones.
- LTCLimites.

4.1. PotenciasNetas.

Esta función no cambia con respecto a la anterior, por lo cual no será necesario describirla de nuevo.

4.2 PotenciasCalculadas.

De nuevo, esta función tampoco variará en este nuevo sistema.

4.3. LTCPotenciasCalculadas.

Esta función será nueva con respecto al programa anterior. Estará dentro del bucle de iteración. Su objetivo será sumarle a las potencias calculadas en la función anterior, la contribución de la línea con el transformador LTC.

Cabe destacar que el bucle sólo es recorrido una vez ya que solo existe un transformador en este sistema estudiado. Las ecuaciones **4.11** a **4.14** utilizadas en

esta sección han sido ya descritas en los apartados previos teóricamente. El resultado al final de esta función serán dos matrices. Una matriz será de las potencias activas calculadas, con una fila y un número de columnas correspondiente al número de nudos. La otra matriz será igual pero para las potencias reactivas.

4.4. LimiteGeneradores.

A continuación se comprobarán los límites de potencia reactiva de los generadores del sistema. Se tratará de la misma función que en el caso de flujo de potencia sin el transformador regulador LTC.

4.5. PotenciasDesajuste.

Se trata de la misma función que para el primer caso de estudio sin transformador regulador. En el caso de que la solución converja, como ya se ha mencionado anteriormente, el indicador Flag hará que se salga del bucle y se habrá llegado a la solución buscada.

4.6. Jacobiana.

Igual ocurre para la quinta función dentro de la función LTCNewtonRaphson. Su programación no variará con respecto al anterior programa ya que sólo se tendrán en cuenta las líneas sin transformadores del sistema. Cambiarán sus dimensiones (20x20), ya que ahora se tiene un nuevo nudo.

4.7. LTCJacobiana.

Esta función será creada para este programa con el transformador regulador de módulo de la tensión. Modificará la Jacobiana anterior gracias a la contribución del transformador LTC. La matriz Jacobiana con un transformador LTC tiene la forma ya descrita en la parte anterior de este trabajo. Será igual a la Jacobiana normal, pero al estar controlando la tensión en el *nudo* 5 cambiarán algunos términos de acuerdo a la expresión **4.10**. Tendrá la estructura de dimensiones: $n^{\circ}nudos * 2 \times n^{\circ}nudos * 2$. (20x20). Los términos derivativos serán los descritos en las ecuaciones **4.15** a **4.30**.

Para el caso de que las tomas se sobrepasen, el nudo pasará a ser PQ generador como ya se explicó anteriormente. Y ya la toma tomará un valor fijo en el límite sobrepasado y la tensión no se podrá controlar. Entonces la matriz tomará la forma ya mencionada anteriormente en la ecuación **4.10**.

Después de la función LTCJacobiana y antes de ActualizacionVariablesEstado es necesario realizar la misma operación **5.1** que en el caso del flujo de potencia sin transformador regulador.

4.8. ActualizacionVariablesEstado.

Tras haber hallado la matriz D , se actualizarán las variables de la misma forma que en el algoritmo anterior.

4.9. LTCActualizaciones.

Esta función será nueva en este modelo y será la siguiente a llamar dentro de la función LTCNewtonRaphson. Su objetivo será actualizar las tomas del transformador regulador en cada iteración para que la tensión en el nudo a controlar esté en el valor asignado según se describe en la ecuación 4.31. Por lo cual, la tensión del nudo 5 que se ha actualizado en la función anterior no será correcta y se le asignará un valor de 1 por unidad, que es el valor que queremos.

4.10. LTCLimites.

El objetivo de esta función será revisar si se han superado los límites de las tomas superiores e inferiores, para que se asignen en ese valor máximo o mínimo. En dicho caso, como ya se ha mencionado, el nudo dejará de ser PVT ya que el módulo de la tensión ya no será el valor requerido en un principio. Este nudo pasará a ser un nudo PQ de generador, conocidos la potencia activa y reactiva y desconocido el módulo de la tensión. Si son superados, la actualización de la toma no se llevará a cabo y se actualizará el módulo de la tensión en dicho nudo.

5. FlujoPQ.

Tras finalizar la llamada de la función LTCNewtonRaphson en la función principal, se llamará a esta función. Se trata de la misma función del programa anterior, en la cual se calcula el flujo de potencias activas y reactivas por las líneas del sistema estudiado. Se calculará la potencia que sale o que llega a cada nudo por cada línea de transmisión. No se tendrá en cuenta la línea del transformador de tomas variables en esta función. El flujo de potencia por esta línea se calculará en la siguiente llamada dentro de la función principal.

6. LTCFlujoPQ.

Por último, en esta función se calculará el flujo de potencia por la línea del transformador con tomas variables. Será la última llamada dentro de la función principal del programa. Con las fórmulas 4.11 a 4.14 de la potencia por el transformador tanto activa como reactiva, se hallara el flujo de potencia. Esto es fácil una vez halladas las tensiones en cada nudo y la posición de la toma final.

5.2.4 Soluciones del sistema. Caso base: LTC

En primer lugar, el número de iteraciones se muestra en la **Tabla 5.10**.

Tabla 5.10. Número iteraciones para la convergencia en flujo de potencia con transformador regulador LTC.

Iteraciones	14
-------------	----

Los resultados de las tensiones en módulo y argumento de los nudos del sistema estudiado son enunciados en la **Tabla 5.11**.

Tabla 5.11. Tensiones del flujo de potencia con transformador regulador LTC en el sistema.

NUDO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VM (pu)	1.04	1.025	1.025	1.0267	<u>1.000</u>	1.0120	1.0212	1.0125	1.0312	0.9769
VA (grados)	0	11.960	6.2540	-2.2204	-4.5029	-3.1417	6.3748	2.9188	3.5531	-0.3392

Como se puede ver en la tabla, las tensiones están dentro del intervalo adecuado de 0.95 a 1.05 en por unidad. Sin embargo, se puede ver que los módulos de ellas han disminuido con respecto al caso base sin ningún transformador regulador. Esto se debe a que al controlar la tensión en un nudo, interfiere en los módulos de las tensiones del resto de los nudos del sistema. Como el control de la tensión en el nudo 5 no es muy severo ya que no varía mucho con respecto a la tensión que había en ese nudo, los módulos de las tensiones no varían mucho. Sin embargo, el control es bueno dado que ninguna tensión se sale de los límites. El nudo 10 disminuye mucho el módulo de la tensión.

En la siguiente **Tabla 5.12** se muestran las potencias complejas enviadas y recibidas en cada línea del sistema estudiado.

Tabla 5.12. Flujos de potencia en por unidad por las líneas para el caso con transformador regulador LTC en el sistema.

Numero línea	Nudo inicio	Nudo final	P enviada	Q enviada	P recibida	Q recibida	Perdidas Activa (pu)
1	1	4	0.7182	0.2542	-0.7182	- 0.2233	0.0000
2	4	6	0.2052	0.0444	-0.2042	- 0.2035	0.0009
3	4	5	0.5130	0.1789	-0.5098	- 0.3325	0.0032
4	6	9	-0.6958	- 0.0965	0.7145	- 0.1956	0.0187
5	10	7	-0.7402	-0.2251	0.7588	0.0130	0.0186
6	2	7	1.63	0.1417	-1.63	0.0176	0.0000
7	7	8	0.8712	-0.0306	-0.8650	- 0.0709	0.0062
8	9	8	0.1355	0.0655	-0.1350	-0.2791	0.0006
9	3	9	0.85	-0.0893	-0.85	0.1300	0.0000
Línea LTC	5	10	-0.7402	-0.1675	0.7402	0.2251	0.0000

Al introducir este transformador regulador, se aprecia que el flujo de potencia por las líneas varían. En algunas líneas se aprecian más cambios que en otras como se puede ver en la **Figura 5.6**.

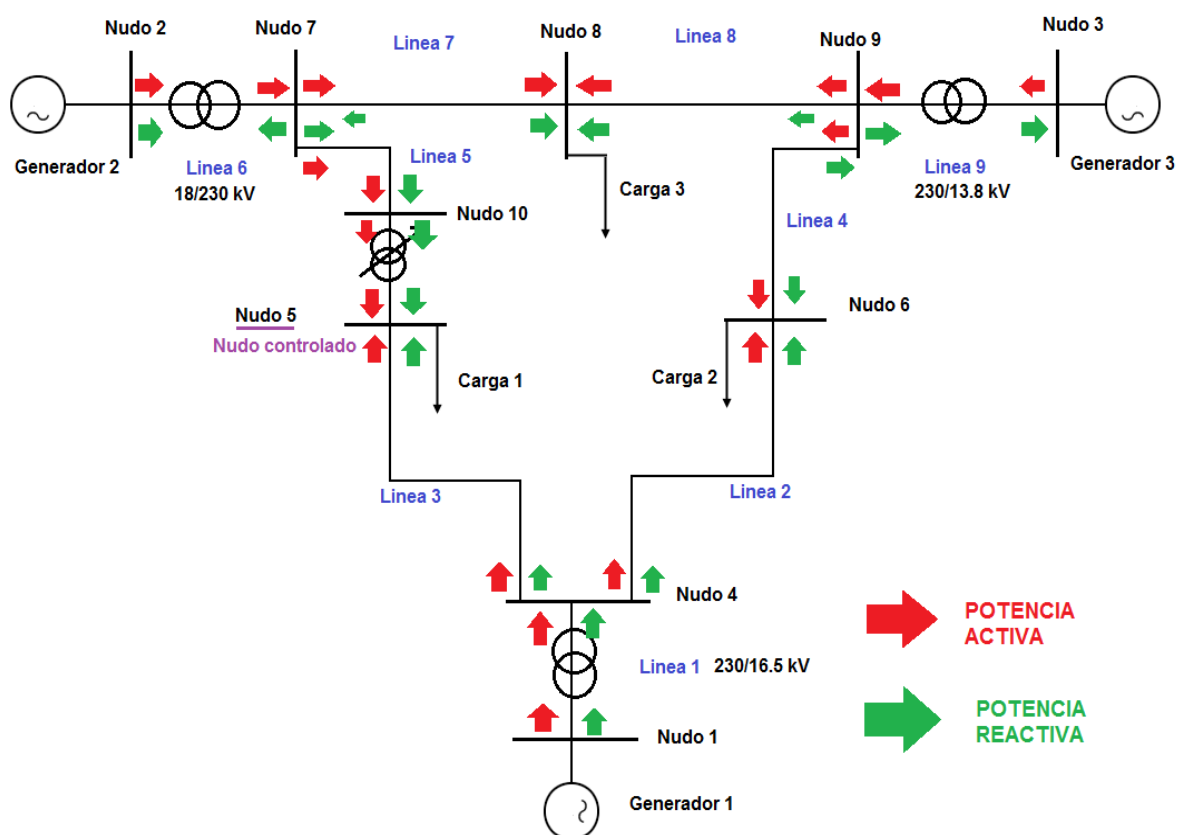


Figura 5.6. Representación del flujo de potencia por el sistema estudiado al incluir un transformador regulador de módulo de la tensión que controla el nudo 5.

Se aprecia lo siguiente:

- El generador 1 y 2 ceden potencia reactiva. El generador 3 la absorbe. Esto coincide con el caso anterior sin transformador regulador.
- Los tres transformadores de potencia absorben potencia reactiva ya que siempre es así.
- Las líneas 2, 3, 4, 5, 7 y 8 ceden potencia reactiva. Todas, menos los transformadores de potencia.
- La línea 5 absorbe potencia reactiva y la cede a la barra del transformador.
- El transformador regulador absorbe potencia reactiva.
- El único cambio de sentido se da en la línea 5, en el cual la potencia reactiva sale del nudo 7 en vez de entrar. Se debe a que se necesita más potencia reactiva en esa línea ya que se la ha de ceder al transformador regulador.

Esto significa que el flujo de potencia por las líneas ha variado muy poco. La razón de esto es que el control a realizar ha sido pequeño y no severo.

La **Tabla 5.13** siguiente muestra las pérdidas totales de potencia activa.

Tabla 5.13 Pérdidas totales potencia activa en por unidad del sistema.

Pérdidas totales P activa (pu)	0.0482
---------------------------------------	---------------

Como se aprecia, las pérdidas del sistema han aumentado levemente con respecto al caso anterior debido al control de la tensión. Esto se debe a que los módulos del resto de los nudos del sistema han disminuido. Cuanto menor es el módulo de la tensión, mayores son las pérdidas.

En cuanto a la posición de la toma necesaria para que el módulo de la tensión en el nudo 5 se mantenga en 1 por unidad se muestra en la **Tabla 5.14**.

Tabla 5.14. Posición de toma del transformador LTC para el control de la tensión en el nudo 5.

Toma (Tap)	1.0435
-------------------	---------------

No se sale de los límites del transformador por lo cual la tensión del nudo 5 es controlada perfectamente. Cabe destacar que al querer aumentar el valor anterior del módulo de la tensión, la toma es mayor que 1. En caso contrario, sería al revés.

5.3. FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR PS.

En este apartado se controlará la potencia activa de una determinada rama del sistema estudiado. La rama a controlar será la del transformador regulador, por consiguiente, la rama que va del nudo 5 al nudo 7. La potencia que llega al nudo 5

para el caso inicial es: $P = 0.8432$ desde el nudo 7 al 5. Se pretende disminuir la potencia por esa línea. El sistema quedará como en la **Figura 5.7**.

1. Se añade un nuevo nudo (nudo 10).
2. La línea 5 anterior iba del nudo 5 al 7, ahora irá del 10 al nudo 7.
3. El transformador PS irá del nudo 5 al nudo 10 y se controlará la potencia activa por la línea del transformador que llega al nudo 5 que es el controlado.

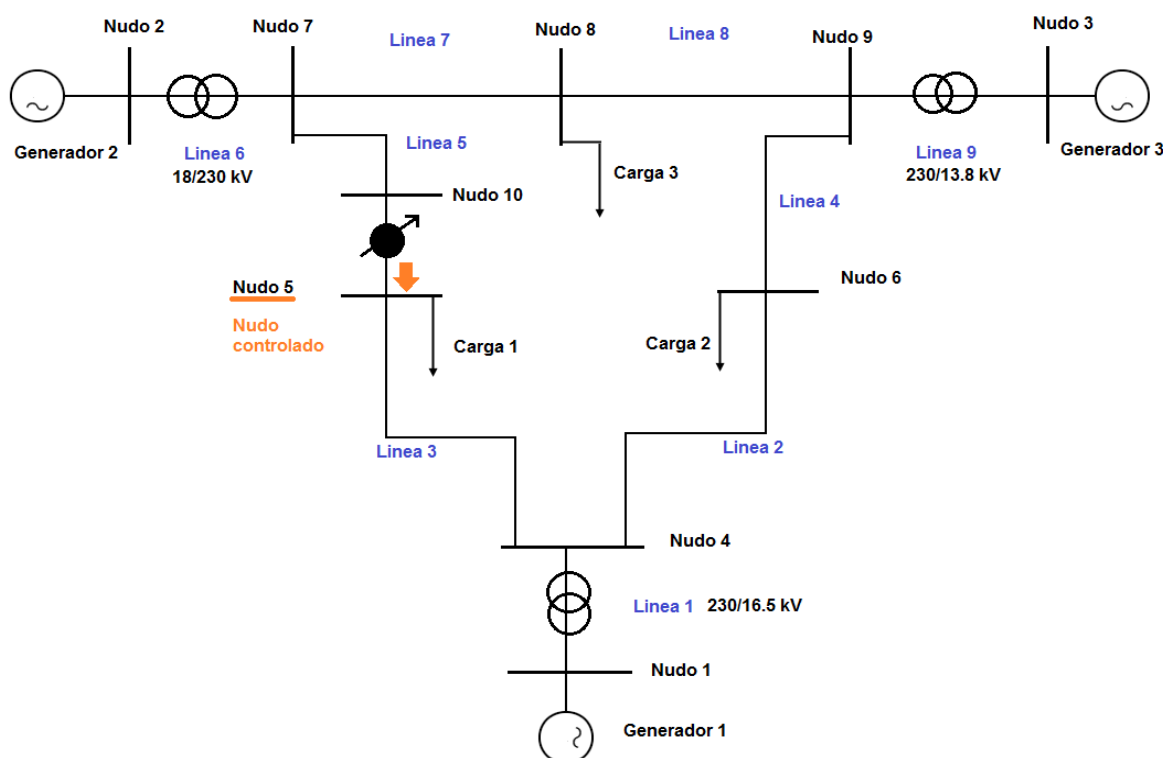


Figura 5.7. Sistema estudiado con la inclusión del transformador regulador de la fase de la tensión.

5.3.1 Datos del transformador PS.

El transformador tendrá las propiedades mostradas en la **Tabla 5.15**.

Tabla 5.15. Datos del transformador regulador de fase.

TRANSFORMADOR PS	
NUDO INICIO	5
NUDO FINAL	10
RESISTENCIA (pu)	0
REACTANCIA (pu)	0.1
Límites de fase (grados)	± 10
NUDO CONTROLADO	5
POTENCIA (pu) REQUERIDA	-0.6 (Entra)

El nudo controlado es el nudo 5 y se querrá que la potencia activa entrante sea de ese valor. Los límites máximos y mínimos de la regulación de fases posibles serán:

- $10\pi/180$ *radianes* = 10 *grados*
- $-10\pi/180$ *radianes* = 10 *grados*

El objetivo será fijar una potencia activa en el nudo controlado.

5.3.2 Diagrama de flujo.PS.

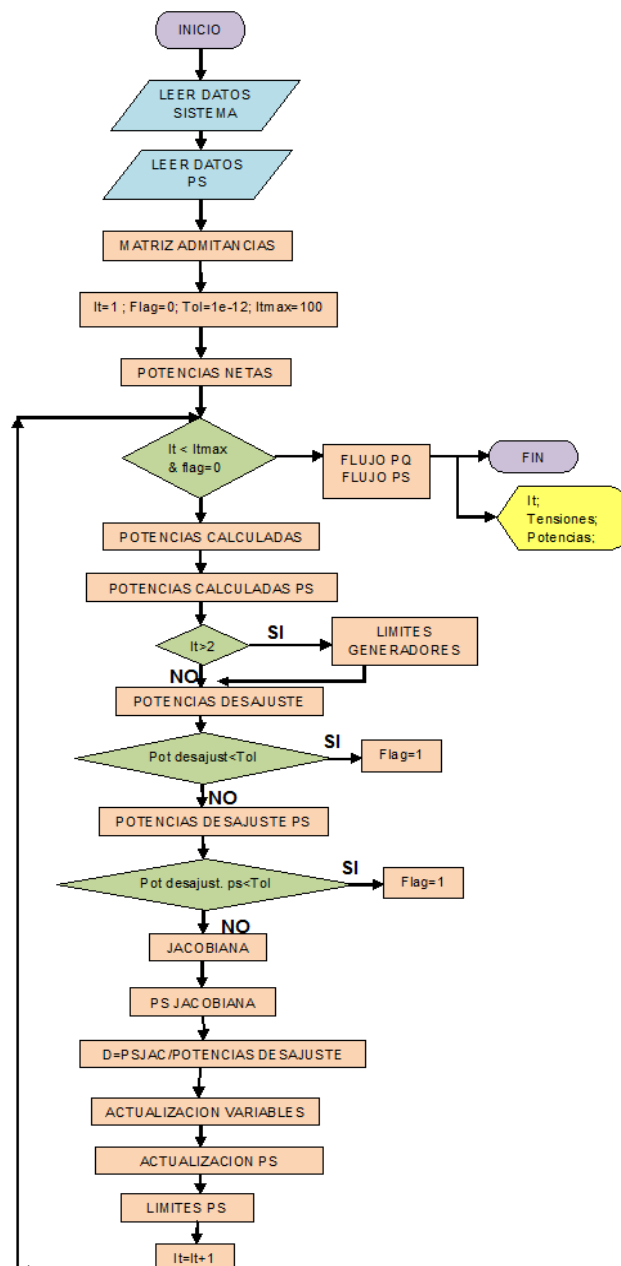


Figura 5.8. Diagrama de flujo para el algoritmo de resolución del flujo de potencia con un transformador regulador de tipo PS.

5.3.3 Algoritmo en Matlab.

En este apartado se implementará el modelo del transformador regulador de fase de la tensión. Unas funciones coinciden con el primer modelo sin ningún tipo de transformador y otras no. Las funciones que coinciden son:

- DatosFlujoPotencia
- YBus
- FlujoPQ

Por otro lado otras funciones serán sustituidas.

- NewtonRaphson será sustituida por PSNewtonRaphson.

Y otras serán añadidas en la función principal:

- PSDatosFlujoPotencia es añadida en el programa principal con los datos del transformador regulador de fase o PS.
- PSFlujoPQ para el cálculo del flujo de potencias activas y reactivas por la línea del PS.

La función PSNewtonRaphson tendrá en su interior funciones que se mantendrán constantes de la anterior función NewtonRaphson.

- PotenciasNetas
- PotenciasCalculadas
- LimiteGeneradores
- PotenciasDesajuste
- Jacobiana
- ActualizacionVariablesEstado

Se añadirán otras cinco funciones dentro de la función PSNewtonRaphson.

- PSPotenciasCalculadas
- PSPotenciasDesajuste
- PSJacobiana
- PSActualizaciones
- PSLimites

ProgramaPrincipal.

- 1. Lectura de datos del sistema: DatosFlujoPotencia**
- 2. Lectura de datos del transformador PS: PSDatosFlujoPotencia**
- 3. Función: Ybus**
- 4. Función: PSNewtonRaphson**
 - 4.1 PotenciasNetas**
 - 4.2 PotenciasCalculadas**
 - 4.3 PSPotenciasCalculadas**
 - 4.4 LimiteGeneradores**
 - 4.5 PotenciasDesajuste**
 - 4.6 PSPotenciasDesajuste**
 - 4.7 Jacobiana**
 - 4.8 PSJacobiana**
 - 4.9 ActualizacionVariablesEstado**
 - 4.10 PSActualizaciones**
 - 4.11 PSLimites**
- 5. Función: FlujoPQ**
- 6. Función: PSFlujoPQ**

- **FUNCION MAIN:** ProgramaPrincipal

1. DatosFlujoPotencia.

La primera función llamada desde el programa principal lee los datos correspondientes al sistema como ya se ha mencionado en los anteriores programas.

2. PSDatosFlujoPotencia.

Esta nueva función lee los datos del transformador regulador de fase.

3. YBus:

Esta función coincide con la del flujo de potencia sin ningún tipo de transformador.

4. PSNewtonRaphson.

4.1 PotenciasNetas.

Al igual que en el caso anterior, esta función coincide con el primer flujo de potencia, ya que los datos coinciden y además van en función de variables leídas en la función DatosFlujoPotencia.

4.2 PotenciasCalculadas.

De nuevo, esta función coincide con el primer caso estudiado.

4.3 PSPotenciasCalculadas.

Esta función será nueva en este programa, ya que como se ha visto, las ecuaciones de potencias calculadas en una línea con transformador regulador de fase de la tensión no coinciden. Las ecuaciones para el cálculo de las potencias calculadas en la línea del transformador PS se definieron en las ecuaciones **4.41** a **4.44**.

4.4 LimiteGeneradores.

Esta función coincide con el algoritmo de resolución sin ningún transformador regulador. Por ello no se volverá a explicar su contenido.

4.5 PotenciasDesajuste.

De nuevo se tratará de la misma función utilizada anteriormente. Si la solución converge, se saldrá del bucle y se obtendrán los resultados requeridos. Sin embargo, como se vio en la teoría, ahora la matriz de potencias de desajuste tendrá dimensiones: $1 \times n^{\circ} \text{ buses} * 2 + n^{\circ} \text{ PS}$. (1×21). Como la función es la utilizada anteriormente, el término 21 se queda vacío.

4.6 PSPotenciasDesajuste.

En este tipo de transformadores PS, es necesario actualizar con la contribución en las potencias de desajuste, es decir, sirve para rellenar el término 21 de la matriz de potencias de desajuste. $\Delta P_{5-7}^{\emptyset PS} = P_{5-7}^{\text{requerida}} + P_{5-7}^{\emptyset PS}$. Tras rellenar este último término de la matriz de potencias de desajuste, se vuelve a comprobar la convergencia para ese último término. Si todos son menores que la tolerancia establecida, se habrá llegado a la solución.

4.7 Jacobiana.

Esta función coincide con los anteriores casos de estudio. La diferencia es que tendrá dimensiones $n^{\circ} \text{ nudos} * 2 + n^{\circ} \text{ PS} \times n^{\circ} \text{ nudos} * 2 + n^{\circ} \text{ PS}$, es decir, 21×21 . La última fila y columna se rellenará en la siguiente función. Los términos derivativos son mencionados en las ecuaciones **4.46** a **4.66**.

4.8 PSJacobiana.

En esta función se rellenará esta última fila y columna de la matriz Jacobiana.

Tras la construcción de la Jacobiana, se hará la operación **5.1** necesaria para hallar la matriz D .

4.9 ActualizacionVariablesEstado.

Se trata de la misma función ya utilizada. Con la matriz D se actualizarán los módulos y argumentos de las tensiones.

4.10 PSActualizaciones.

Se actualizará la toma del transformador PS (\emptyset) con la ayuda de la ecuación **4.67**.

4.11 PSLimites.

Si se sobrepasa el límite de la toma del transformador tanto por arriba como por abajo. Se le asigna el valor máximo o mínimo a la toma y no habrá ningún nudo controlado. El transformador PS ya no controlará la potencia por la línea requerida.

5. FlujoPQ.

Con esta función, como ya se describió anteriormente, se hallan las potencias que salen y que llegan por cada línea. Así se podrá hallar las pérdidas de cada una y también las pérdidas totales del sistema.

6. PSFlujoPQ.

Esta es la última función en el programa principal. Su objetivo es hallar las potencias enviadas y recibidas por cada línea con transformador regulador de fase o PS en cada nudo con las ecuaciones **4.41** a **4.44**.

5.3.4 Soluciones del sistema. Caso 1: PS.

Al introducir este transformador regulador PS, se aprecia que el flujo de potencia por las líneas varía. En este caso, se ha variado la potencia activa que entra al nudo 5 por la línea del transformador PS.

Su antiguo valor sin el transformador PS era:

- $P \text{ enviada } 5 \text{ (línea } 5) \text{ antigua} = -0.8432 \text{ pu}$

El nuevo valor que se quiere que circule es:

- $P \text{ enviada } 5 \text{ (línea PS) nueva} = -0.6 \text{ pu}$

En primer lugar, el número de iteraciones para llegar a la solución se muestra en la **Tabla 5.16**.

Tabla 5.16. Número de iteraciones necesario para llegar a la convergencia en el sistema con transformador PS.

Iteraciones	5
-------------	---

Los resultados de las tensiones se aprecian en la **Tabla 5.17**.

Tabla 5.17. Tensiones del flujo de potencia con transformador regulador PS en el sistema.

NUDO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VM (pu)	1.04	1.025	1.025	1.0215	0.9882	1.0069	1.0264	1.0152	1.0311	1.0021
VA (grados)	0	15.337	8.3205	-2.2465	-5.2165	-2.4524	9.7805	5.7802	5.6192	4.3988

Se aprecia que las tensiones están en el intervalo de 0.95 a 1.05 en por unidad. También se puede ver que los módulos de ellas han disminuido muy levemente con respecto al caso base sin ningún transformador regulador. En cuanto a los desfases, se aprecia mucha variación con respecto al caso base sin ningún transformador. Esto es debido a que la potencia activa está relacionada con los desfases de las tensiones. Al controlar la potencia activa en un nudo, interfiere en los ángulos de las tensiones del resto de los nudos del sistema y no en el módulo. La disminución del módulo puede deberse a la inclusión de un nuevo nudo. El control es bueno dado que ninguna tensión se sale de los límites.

En la **Tabla 5.18** se muestran las potencias complejas enviadas y recibidas en cada línea del sistema estudiado.

Tabla 5.18. Flujos de potencia en por unidad por las líneas para el caso con transformador regulador PS en el sistema.

Numero línea	Nudo inicio	Nudo final	P enviada	Q enviada	P recibida	Q recibida	Perdidas Activa (pu)
1	1	4	0.7230	0.3483	-0.7230	- 0.3140	0.0000
2	4	6	0.0677	0.0667	-0.0673	- 0.2269	0.0004
3	4	5	0.6552	0.2473	-0.6500	- 0.3807	0.0052
4	6	9	-0.8327	- 0.0731	0.8598	- 0.1805	0.0271
5	10	7	-0.6000	-0.1576	0.6115	- 0.0955	0.0115
6	2	7	1.63	0.0556	-1.63	0.1027	0.0000
7	7	8	1.0185	-0.0032	-1.0101	- 0.0808	0.0084
8	9	8	-0.0098	0.0529	0.0101	-0.2692	0.0003
9	3	9	0.85	-0.0868	-0.85	0.1275	0.0000
Línea PS	5	10	-0.6000	-0.1193	0.6	0.1576	0.0000

Como el cambio ha sido muy pequeño, las potencias activas y reactivas no han variado de sentido casi nada como se muestra en la **Figura 5.9**.

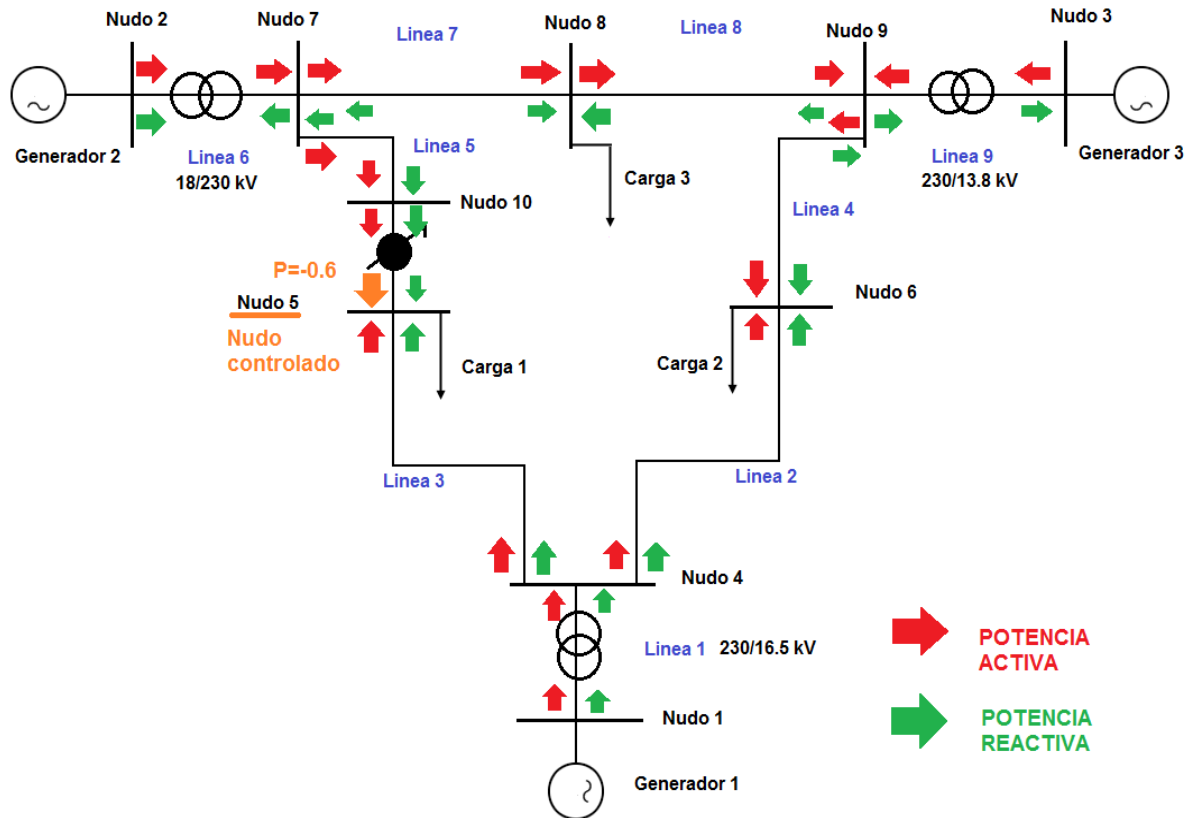


Figura 5.9. Representación del flujo de potencia por el sistema al introducir un transformador regulador del ángulo o PS.

Gracias a la figura anterior se llega a las siguientes conclusiones:

- El generador 1 y 2 genera potencia reactiva. El generador 3 sigue consumiendo potencia reactiva. Estos factores coinciden con el caso base sin transformador regulador.
- Los tres transformadores siguen consumiendo potencia reactiva.
- Las líneas que generan potencia reactiva en este caso son la 2, 3, 4, 5, 7 y 8. Es decir, todas las que existen menos las líneas de los transformadores de potencia.
- El transformador regulador de fase consume potencia reactiva.
- Al reducir la potencia activa por la línea 5, por la línea 4 fluye más potencia activa. A su vez, la potencia activa por la línea 7 aumenta mucho y podría no ser apta para la línea. Las pérdidas totales aumentan mucho como se ve en la **Tabla 5.19**.
- El control se realiza pero no es bueno debido a la gran cantidad de pérdidas.

- El único cambio de sentido que se aprecia se da en la línea 8 en la cual la potencia activa fluye hacia el nudo 9. Esto se debe a que ahora el mayor flujo de potencia activa va por la línea 4 y no la 5.

La **Tabla 5.19** siguiente muestra las pérdidas totales de potencia activa.

Tabla 5.19. Pérdidas totales potencia activa en por unidad del sistema con transformador PS.

Pérdidas totales P activa (pu)	0.530
---------------------------------------	--------------

Como se aprecia, las pérdidas del sistema han aumentado con respecto al caso base sin regulador de fase ni de módulo. Al introducir un método de control de potencia activa, produce que fluya mayor cantidad por otras líneas aumentando las pérdidas totales. Esto se da dependiendo del grado de control.

Tabla 5.20. Posición de la toma del transformador PS.

Toma (\emptyset) rad	-0.1072
Toma (\emptyset) grados	-6.1417

Se ve que está cerca de su límite inferior que es -10 grados. Por lo cual la potencia que entra en el nudo 5 por la línea del PS no podría ser mucho más inferior que 0.6 (valor de potencia activa impuesto), ya que se llegaría al valor mínimo de la toma y el control de la potencia dejaría de llevarse a cabo.

5.3.5 Soluciones del sistema. Caso 2: PS.

En este nuevo caso, la potencia activa que se querrá que entre en el nudo 5 desde la línea del PS será mayor que la que se tenía en el caso sin transformador regulador y también mayor que el primer control realizado. La potencia requerida será: $P = -0.95 \text{ pu}$. Dado que solo se ha cambiado la magnitud, el control sigue siendo de la misma forma y en el mismo nudo, solo será necesario en la función PSDatosFlujoPotencia cambiar el valor de la potencia a controlar (variable $psP = -0.95$).

En la **Tabla 5.21** se muestra el número de iteraciones.

Tabla 5.21. Número de iteraciones necesario para llegar a la convergencia en el sistema con transformador PS para el análisis de dicho transformador.

Iteraciones	6
--------------------	----------

En la **Tabla 5.22** se aprecian los valores de módulo y fase de las tensiones en dichos nudos.

Tabla 5.22. Tensiones del flujo de potencia con transformador regulador PS para el análisis.

NUDO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
VM (pu)	1.04	1.025	1.025	1.0217	0.9833	1.0102	1.0240	1.0145	1.0313	0.9890
VA (grados)	0	6.5033	2.9547	-2.2345	-3.4576	-4.3084	0.9336	-1.6156	0.2540	-7.8387

En la **Tabla 5.23** se muestran las potencias activas y reactivas que salen y llegan a todos los nudos del sistema por cada línea de transmisión.

Tabla 5.23 Flujos de potencia en por unidad por las líneas para el caso con transformador regulador PS en el sistema en el análisis.

Numero línea	Nudo inicio	Nudo final	P enviada	Q enviada	P recibida	Q recibida	Perdidas Activa (pu)
1	1	4	0.7192	0.3452	-0.7192	- 0.3113	0.0000
2	4	6	0.4166	-0.0248	-0.4137	- 0.1227	0.0029
3	4	5	0.3026	0.3362	-0.3000	- 0.4907	0.0026
4	6	9	-0.4863	- 0.1773	0.4953	- 0.1563	0.009
5	10	7	-0.9500	-0.1026	0.9796	- 0.0585	0.0296
6	2	7	1.63	0.0949	-1.63	0.0636	0.0000
7	7	8	0.6504	-0.0051	-0.6469	- 0.1203	0.0035
8	9	8	0.3547	0.0247	-0.3531	-0.2297	0.0016
9	3	9	0.85	-0.0909	-0.85	0.1317	0.0000
Línea PS	5	10	-0.9500	-0.0093	0.95	0.1026	0.0000

En la siguiente **Figura 5.10** se muestra el flujo de potencia.

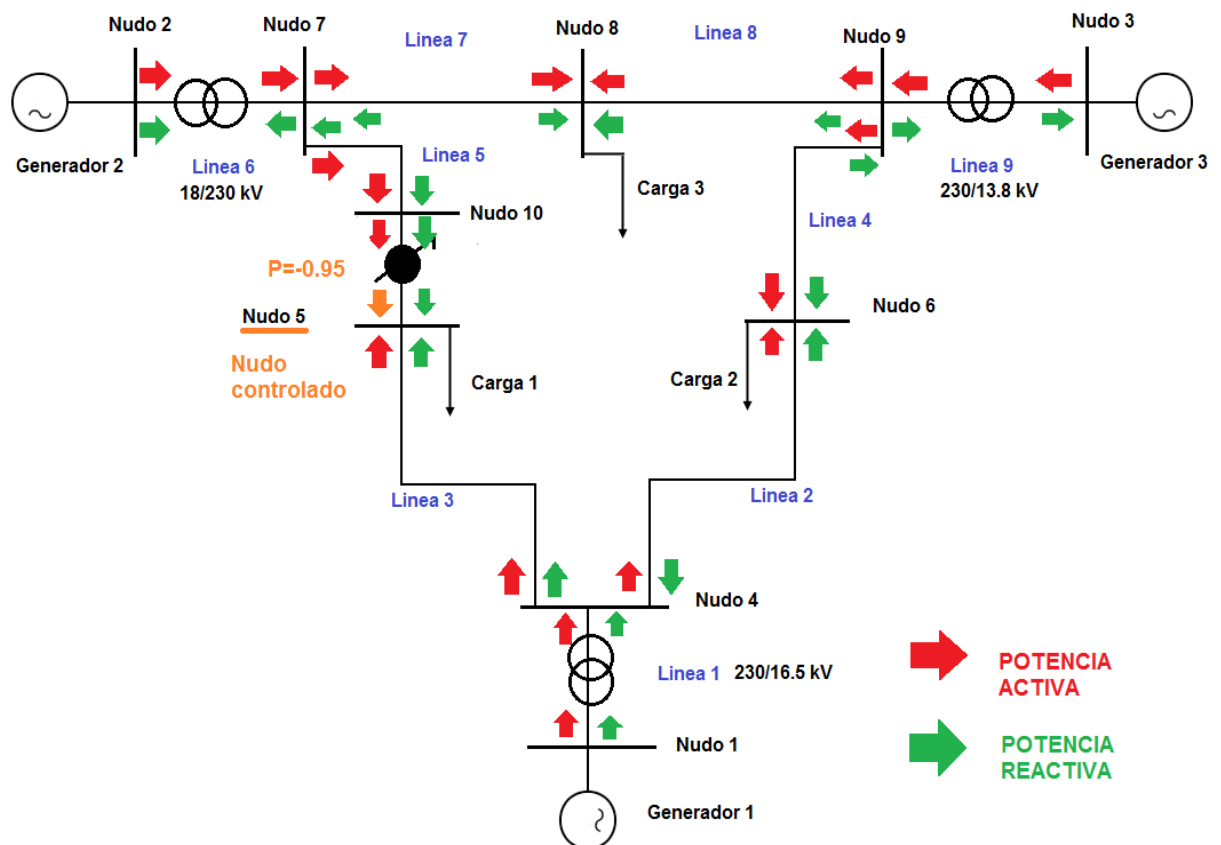


Figura 5.10. Representación del flujo de potencia por el sistema al introducir un transformador regulador del ángulo o PS.

Se concluye lo siguiente:

- Los generadores 1 y 2 siguen generando potencia reactiva. El generador 3 continua consumiendo potencia reactiva.
- Los tres transformadores consumen potencia reactiva como en todos los casos.
- Las líneas que generan potencia reactiva en este caso son la 2, 3, 4, 5, 7 y 8. Como antes, todas las líneas que hay.
- El transformador regulador de fase consume más potencia reactiva que en el anterior control.
- El cambio de sentido que se da con respecto al caso base sin transformador regulador es en la línea 2 en la cual la potencia reactiva fluye hacia el nudo 4 en vez de salir.
- Al aumentar la potencia activa por la línea 5, por la línea 4 fluye menos potencia activa. Entonces, la potencia activa por la línea ha disminuido respecto al control anterior.
- Las pérdidas aumentan con respecto al caso sin transformador regulador pero son menores que las del anterior control. Esto se ve en la **Tabla 5.24**.
- El control se lleva a cabo pero sigue aumentado las pérdidas

Tabla 5.24. Pérdidas totales potencia activa en por unidad del sistema con transformador PS en el análisis.

Pérdidas totales P activa	0.0492
----------------------------------	---------------

Tabla 5.35. Posición de la toma del transformador PS para el análisis.

Toma (\emptyset) rad	0.1743
Toma (\emptyset) grados	9.9871

5.3.6 Límites de operación del PS.

En este último apartado se impondrán unos valores de potencia activa por esa misma línea mucho más extremos para poder fijar los límites de potencia activa que pueden fluir sin que el sistema deje de llegar a la convergencia. Si se consigue el control para alguno de los dos datos de potencia activa es que la línea es capaz de transmitir esa potencia y que el sistema siga convergiendo. Entonces habrá que introducir otros valores aún más extremos hasta que nos dé una solución en la cual el control no se realice.

En este caso, la potencia activa que se querrá que entre en el nudo 5 desde la línea del PS será: $P = -1.1 \text{ pu}$. Solo será necesario cambiar el valor de la potencia a controlar (variable $psP = -1.1 \text{ pu}$) en la función PSDatosFlujoPotencia. En cuanto al otro valor extremo será: $P = 0 \text{ pu}$. (variable $psP = 0 \text{ pu}$).

En la **Tabla 5.26** se muestran los límites de potencia activa que pueden fluir por esa línea del PS entrando en el nudo 5.

Tabla 5.26. Límites de potencia activa por la línea 5.

Potencia activa máxima (pu)	-0.9503	Toma máxima (grados)	10	Pérdidas (pu)	0.0492
Potencia activa mínima (pu)	-0.5145	Toma mínima (grados)	-10	Pérdidas (pu)	0.0585

Se concluye:

- El flujo de potencia activa por esa línea no se puede variar de sentido ni ser nulo ya que la toma del transformador llega a su límite mínimo. Posiblemente si los límites de las tomas del transformador fuesen mayores, el flujo de potencia tendría un mayor rango.
- La potencia activa por esa línea tampoco puede aumentar mucho debido al límite.

6. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN.

El objetivo de este capítulo es estudiar como varía la estabilidad de un sistema cuando hay cambios en las cargas del sistema eléctrico. En este caso se tratará de la variación de la potencia consumida por las cargas de dicho sistema. Al ir aumentando la potencia consumida, el módulo de la tensión ira variando dependiendo del tipo de carga. Para analizar la influencia de un transformador regulador en el sistema, se van a realizar diferentes gráficas de nariz o PV mencionadas anteriormente para cada nudo del sistema que presente una carga. En primer lugar, se dibujarán las curvas para el caso en el que no existe transformador regulador en el sistema de todos los nudos con carga. En segundo lugar, se hará lo mismo con la inclusión de un transformador regulador del módulo o LTC. Con ello se podrá analizar la estabilidad del sistema presentado y su variación. En el sistema estudiado, los nudos que presentan una carga son el nudo 5, 6 y 8.

Se analizarán los siguientes casos mencionados anteriormente.

1. Sin ningún tipo de transformador regulador.

- a. Nudo 5.
- b. Nudo 6.
- c. Nudo 8.

2. Con transformador regulador del módulo de la tensión o LTC.

- a. Nudo 5.
- b. Nudo 6.
- c. Nudo 8.

A medida que la potencia absorbida por la carga aumente, los módulos de las tensiones irán variando. Llegará un punto en el que el algoritmo de Newton Raphson implantado en este trabajo, llegue a su número de iteraciones máximas y no alcance la convergencia. Ese punto no será representado en la gráfica PV ya que se ha perdido la estabilidad del sistema y los resultados de las iteraciones no son buenos.

En cuanto al factor de potencia de la carga, para ver la relación entre varios tipos de carga, se estudiarán los siguientes casos:

- $\cos\varphi = 1$
- $\cos\varphi = 0.98$ inductivo
- $\cos\varphi = 0.95$ inductivo
- $\cos\varphi = 0.90$ inductivo
- $\cos\varphi = 0.85$ inductivo
- $\cos\varphi = 0.70$ inductivo
- $\cos\varphi = 0.50$ inductivo
- $\cos\varphi = 0.98$ capacitivo
- $\cos\varphi = 0.95$ capacitivo
- $\cos\varphi = 0.90$ capacitivo
- $\cos\varphi = 0.85$ capacitivo
- $\cos\varphi = 0.70$ capacitivo
- $\cos\varphi = 0.50$ capacitivo

Si la carga es inductiva, absorbe potencia activa y reactiva del sistema. Si la carga es capacitiva, absorbe potencia activa y cede potencia reactiva al sistema. Si el factor de potencia es la unidad, solo absorbe potencia activa.

6.1 ANÁLISIS SIN TRANSFORMADOR REGULADOR.

6.1.1 Nudo 5.

Al realizar el flujo de potencia inicial llamado caso base, con los datos del sistema iniciales, el nudo con menor tensión era el nudo 5 ($0.9956 pu$). Esto tiene su lógica ya que presenta la mayor carga absorbida del sistema, por ello la tensión será menor. Para llevar a cabo las gráficas PV del nudo 5, para cada factor de potencia a estudiar, se ha ido aumentando la potencia activa, hasta llegar a la inestabilidad del sistema.

- **Algoritmo en Matlab®.**

Dado que ya se tenía el algoritmo creado para resolver el flujo de potencia sin ningún tipo de transformador regulador, lo único necesario ha sido añadir una función llamada AnálisisPV1 que realiza un lazo recursivo en el flujo de potencia (ProgramaPrincipal) para cada potencia absorbida en la carga del nudo 5. Tras esto, la función grafica los resultados para poder analizarlos. Otro cambio necesario ha sido que ahora, la función ProgramaPrincipal, tiene dos variables de entrada (PCARGAvariable y QCARGAvariable), ya que son las potencias activas y reactivas absorbidas en dicha carga que irán aumentando. También igual para la función DatosFlujoPotencia.

Por último, en la función DatosFlujoPotencia, la parte en la que se especifican las cargas del sistema, su localización y sus valores se modificará levemente. Se asignará el valor de PCARGAvariable y QCARGAvariable, a la carga que se va ir modificando. En este caso será la carga 1 que está en el nudo 5.

- **Gráficas PV del nudo 5.**

Las gráficas representadas van a ser tres. En primer lugar se representarán los factores de potencia inductivos y capacitivos más cercanos a la unidad junto con el factor unidad en la **Figura 6.1** (1, 0.98i, 0.95i, 0.98c y 0.95c). En segundo lugar se representará de nuevo el factor de potencia unidad con valores menos cercanos a la unidad en la **Figura 6.2** (1, 0.9i, 0.85i, 0.9c y 0.85c). Y por último, el mismo factor unidad con valores mucho más alejados de la unidad en la **Figura 6.3** (1, 0.7i, 0.5i, 0.7c y 0.5c).

A continuación se muestra la **Figura 6.1**.

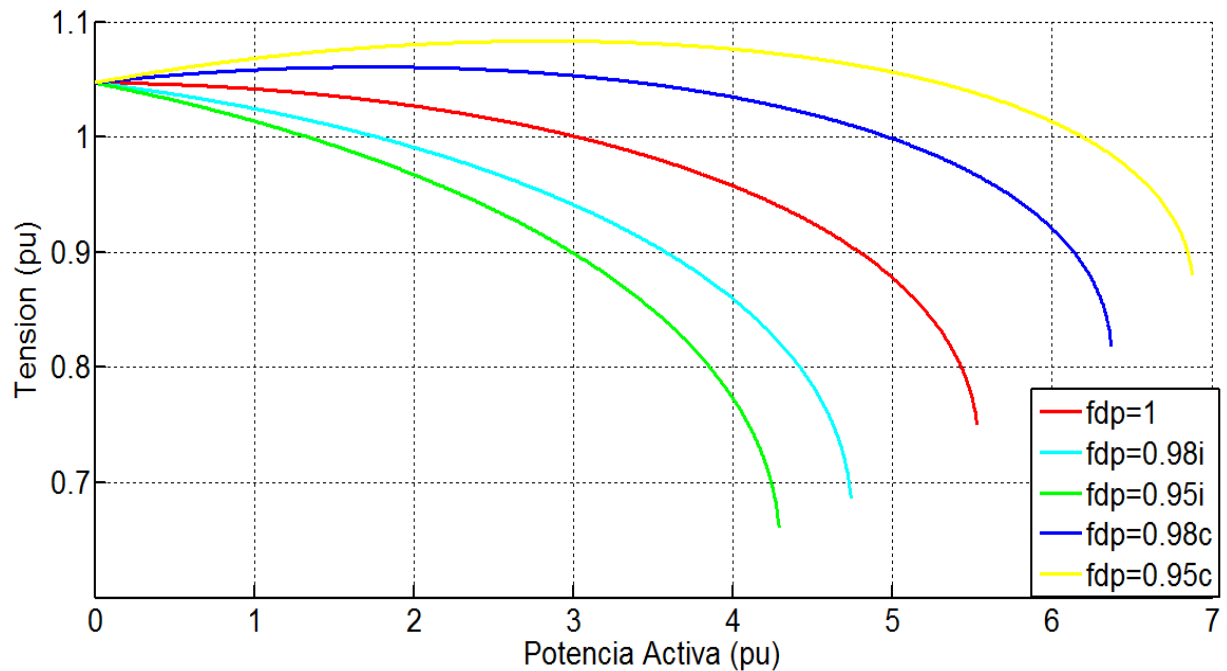


Figura 6.1. Gráfica de nariz o PV del sistema en el nudo 5 cuando no hay transformador regulador en el sistema.

La siguiente figura será la **Figura 6.2**.

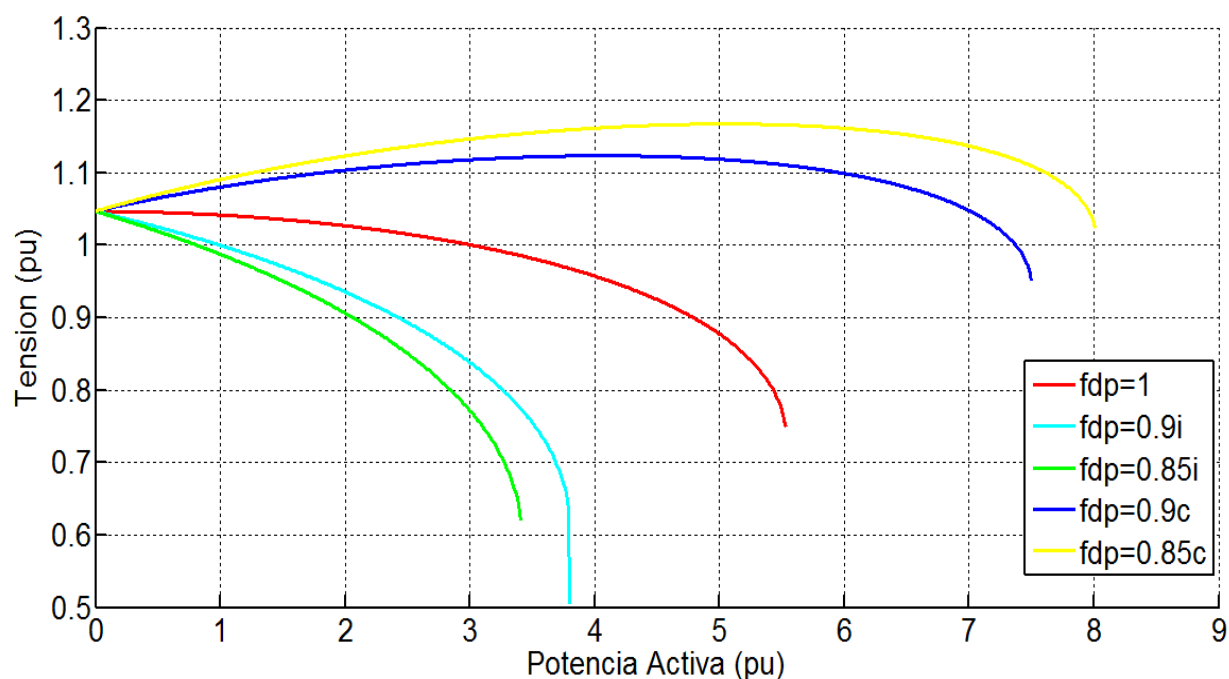


Figura 6.2. Gráfica de nariz o PV del sistema en el nudo 5 cuando no hay transformador regulador en el sistema.

Por último, se muestra la **Figura 6.3**

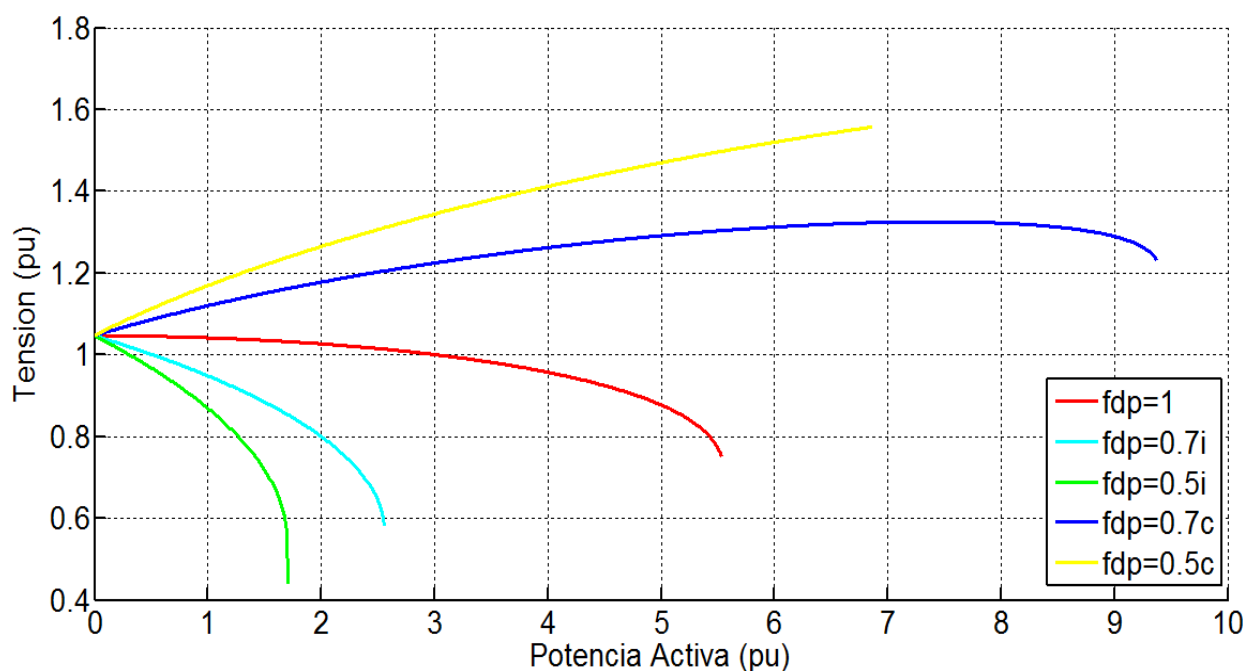


Figura 6.3. Gráfica de nariz o PV del sistema en el nudo 5 cuando no hay transformador regulador en el sistema

Gracias a las gráficas anteriores se sacan las siguientes conclusiones. Se aprecia como para cada factor de potencia de la carga del nudo 5, la tensión varía de distinta forma.

- **Factor de potencia inductivo:** Como se visualiza en las figuras, cuando la carga es inductiva (absorbe potencia reactiva), la tensión siempre disminuye al aumentar tanto la potencia activa como la reactiva. Como ya se mencionó en apartados anteriores, la absorción de potencia reactiva por una carga produce la disminución del módulo de la tensión debido a su estrecha relación. Al igual que la potencia activa está relacionada con las fases o ángulos de las tensiones. También se aprecia que cuanto menor es el factor de potencia inductivo antes se produce la inestabilidad. En la **Figura 6.4** se muestra dicho efecto.

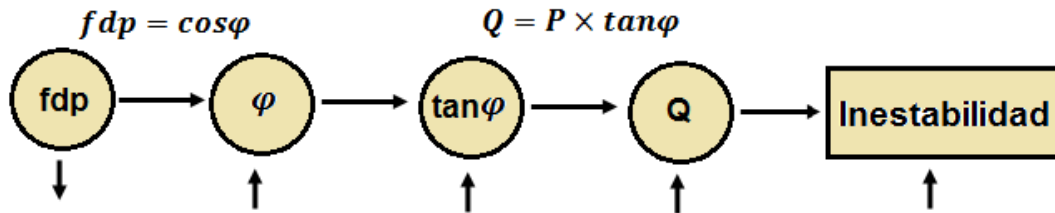


Figura 6.4. Representación de los efectos producidos al disminuir el factor de potencia inductivo.

Si el factor de potencia se aleja de la unidad, es decir, disminuye, el ángulo de carga aumenta y con él la tangente de dicho ángulo. Esto produce que la potencia reactiva absorbida por la carga aumente y por ello la inestabilidad se produce antes.

- **Factor de potencia capacitivo:** Se observa que en un principio la tensión aumenta y luego vuelve a caer. Esto se debe a que una carga capacitiva inyecta potencia reactiva en el sistema pero absorbe potencia activa de él. Al estar aumentando la absorción de potencia activa en la carga, llega un momento que es imposible mantener la tensión en unos valores estables, y se produce la inestabilidad del sistema. Esto se debe a que la potencia activa absorbida esta desacoplada del módulo de la tensión cuando las potencias son pequeñas pero no cuando son elevadas. Sin embargo, esta inestabilidad se produce mucho más tarde que para el caso de factor de potencia inductivo. Si el factor es capacitivo, cuanto menor es el factor de potencia, más tarde se produce la inestabilidad. En la **Figura 6.5** se muestra el efecto que se produce al disminuir el factor de potencia cuando es capacitivo.

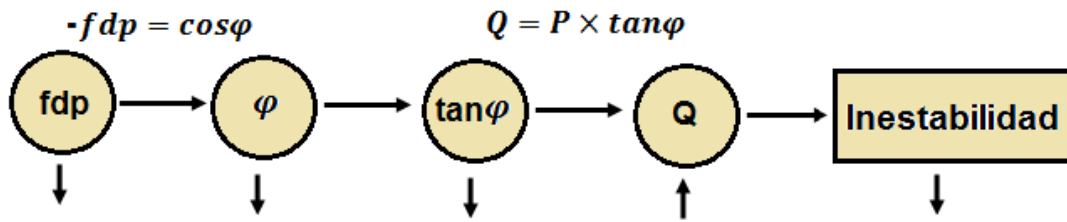


Figura 6.5. Representación de los efectos producidos al disminuir el factor de potencia capacitivo.

En este caso, si el factor de potencia capacitivo disminuye, el ángulo de carga disminuye y también lo hace la tangente. Debido a que el factor se considera negativo para el caso de capacitivo (en el algoritmo implantado), el ángulo es más pequeño cuanto menor es el factor de potencia. Al dar la $\tan\phi$ un valor negativo (hemos introducido un valor de fdp negativo) la potencia reactiva saldrá negativa (será cedida al sistema desde la carga). La tangente disminuye en cuanto al signo pero el módulo de ella aumenta. Por ello, la potencia reactiva cedida al sistema desde la carga aumenta y la inestabilidad se produce más tarde.

- **Factor de potencia unidad:** Este tipo de cargas está en el medio de los dos mencionados anteriormente. No inyecta ni absorbe potencia reactiva de la red y simplemente absorbe potencia activa, llegando a la inestabilidad del sistema cuando la caída de tensión es crítica.

En el caso de haberlo estudiado en el sentido del sistema, sería considerado al contrario. Si la potencia reactiva sale negativa, es cedida por el sistema a la carga, y este sería considerado inductivo. Si la potencia reactiva sale positiva, el sistema absorbe potencia de la carga y por ello será capacitiva. Dado que en nuestro algoritmo de Matlab® las potencias absorbidas en las cargas introducidas tenían un valor positivo, el punto de vista requerido era el de la carga (absorbiendo).

Por otro lado, cuando los valores de los factores de potencia son más extremos se ve que la gráfica está más extendida. Se aprecia que para el caso inductivo, la inestabilidad ha aumentado, y para el caso del capacitivo ha disminuido. La carga inductiva soporta menos potencia que la carga capacitiva y por ello se vuelve inestable antes. Esto demuestra lo mencionado anteriormente.

6.1.2 Nudo 6.

En este caso se harán las gráficas PV sobre el nudo 6 del sistema estudiado. Este nudo presenta una tensión de 1.0127 pu para el caso sin transformador regulador. Al estar sobre 1 pu tiene una tensión aceptable pero se va a estudiar su estabilidad igualmente.

- **Algoritmo en Matlab®.**

Su gráfica PV se ha realizado con el mismo algoritmo del apartado anterior salvo que la asignación de las variables *PCARGAvariable* y *QCARGAvariable* en la función *DatosFlujoPotencia* se hará a la carga número 2 situada en el nudo 6 del sistema planteado. También a la hora de guardar los valores de los módulos de las tensiones con cada aumento de potencia activa, habrá que cambiar el índice de VM. Esto se explica en el Anexo IV.

- **Gráficas PV del nudo 6.**

Para este caso del nudo 6, se hará lo mismo que el caso del nudo 5. Las tres gráficas halladas se muestran en la **Figura 6.6**, **Figura 6.7** y **Figura 6.8**. Primero se muestra la **Figura 6.6**.

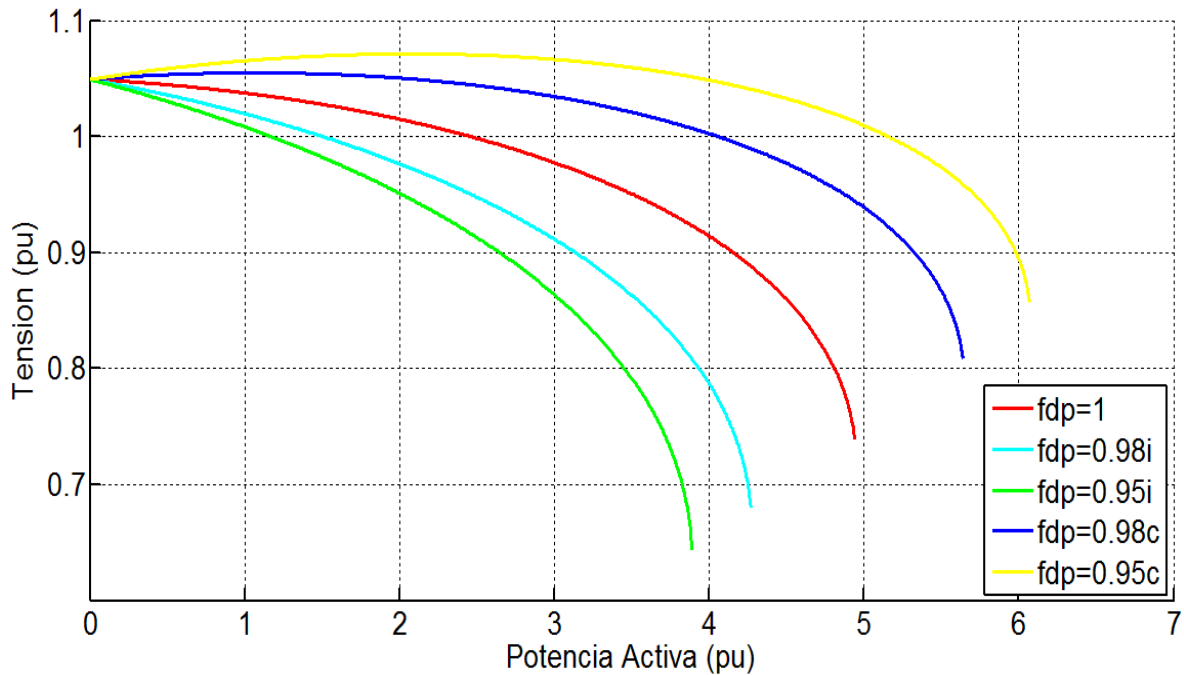


Figura 6.6. Gráfica PV o nariz para el nudo 6 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.

Como se aprecia en la **Figura 6.6**, este nudo soporta mucha menos potencia para todos los casos de factor de potencia que el nudo 5 anterior (**Figura 6.1**). El sistema se vuelve inestable para valores de potencia activa mucho más bajos. Según los módulos de las tensiones para el caso base sin transformador regulador, el nudo más crítico era el nudo 5 ya que presentaba una tensión más baja que el nudo 6. Sin embargo, en vista de los resultados se llega a la conclusión de que el nudo 6 es más crítico que el nudo 5 debido a su poca estabilidad. Esto puede deberse a que al ser el nudo 5 el que más potencia absorbe del sistema, produce que los otros nudos lleguen a la inestabilidad mucho antes.

A continuación se muestran la **Figura 6.7** y **Figura 6.8**.

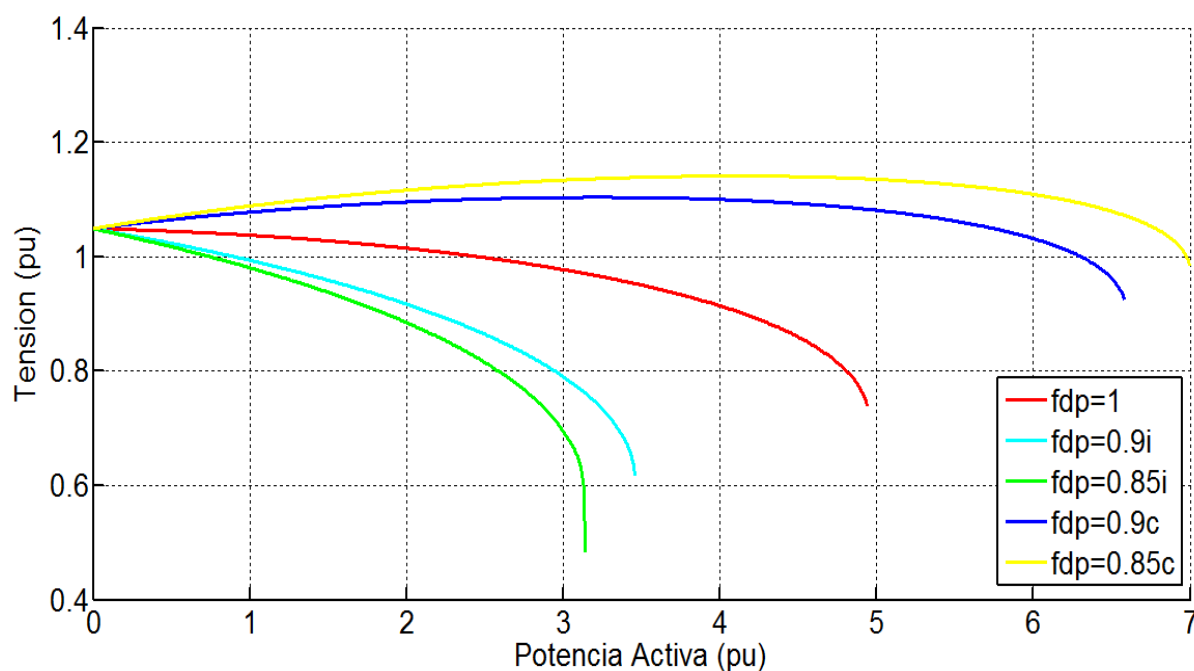


Figura 6.7. Gráfica PV o de nariz para el nudo 6 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.

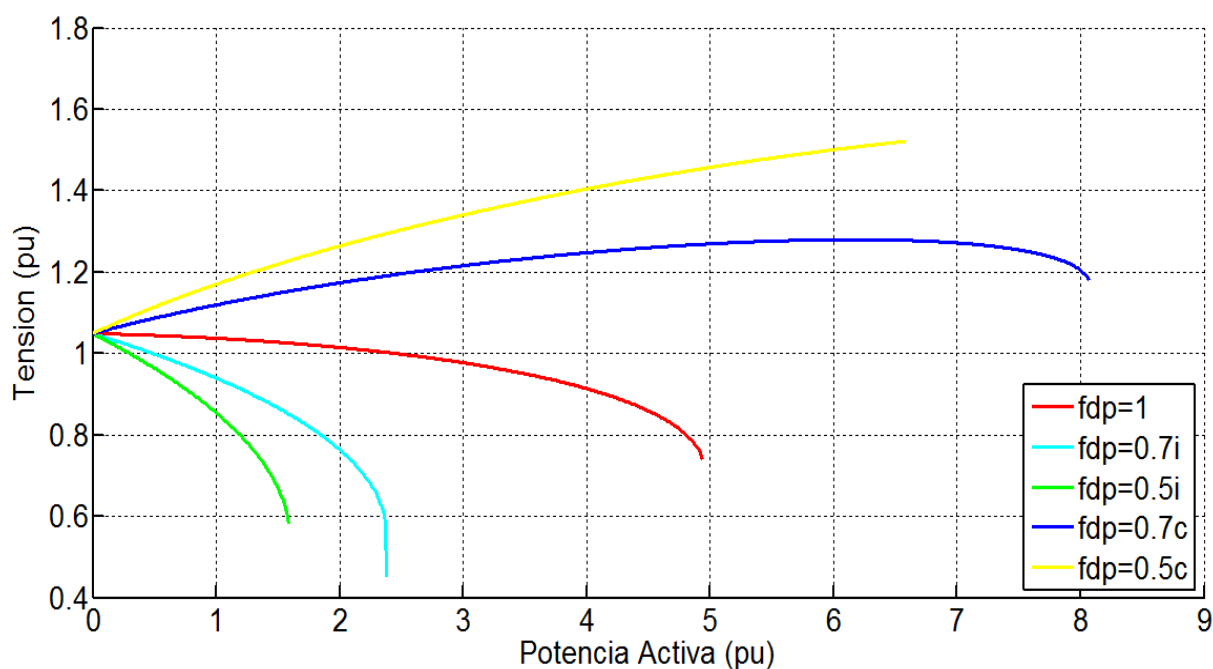


Figura 6.8. Gráfica PV o de nariz para el nudo 6 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.

Para otros valores de factor de potencia, ocurre lo mismo, la gráfica también se extiende. Esto se aprecia en la **Figura 6.7** y **Figura 6.8**. Comparando estas gráficas con las del nudo 5 y para los mismos factores de potencia, el nudo 6 muestra una mayor inestabilidad para todos los casos.

Se aprecia que aunque el $f_{dp} = 0.5c$ entrega mas potencia reactiva que el $f_{dp} = 0.7c$, la estabilidad de este último es mayor. Con el primer factor mencionado se pierde la convergencia antes. Esto también ocurre en la **Figura 6.3** del nudo 5.

6.1.3 Nudo 8.

El último nudo a examinar es el nudo 8 (carga numero 3) que contaba inicialmente con una tensión en por unidad de 1.0159 pu . Es el que mayor tensión presenta de los tres nudos estudiados.

- **Algoritmo en Matlab®.**

De nuevo, se utiliza el mismo programa anterior pero se asignan las variables *PCARGAvariable* y *QCARGAvariable* a la carga del nudo 8. También se realiza el cambio de *VM(6)* a *VM(8)* para guardar los valores de las tensiones en el vector respectivo.

- **Graficas PV del nudo 8.**

Las gráficas del nudo 8 de este apartado se representan en la **Figura 6.9**, **Figura 6.10** y **Figura 6.11**.

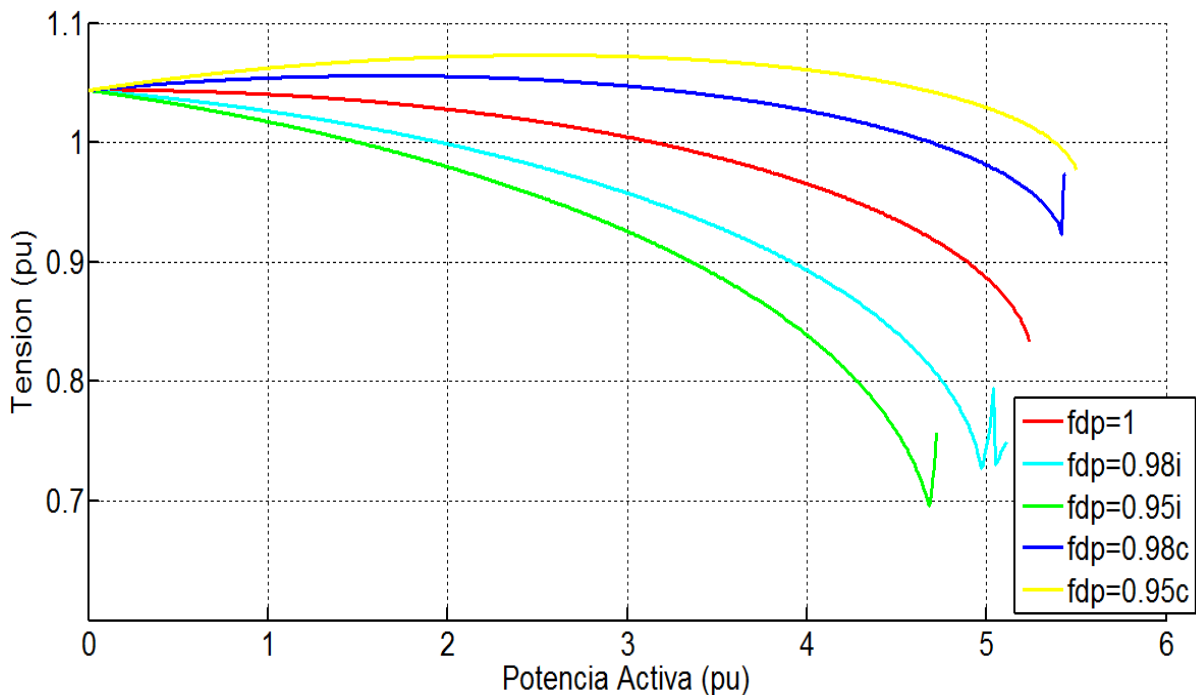


Figura 6.9. Gráfica PV o de nariz para el nudo 8 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.

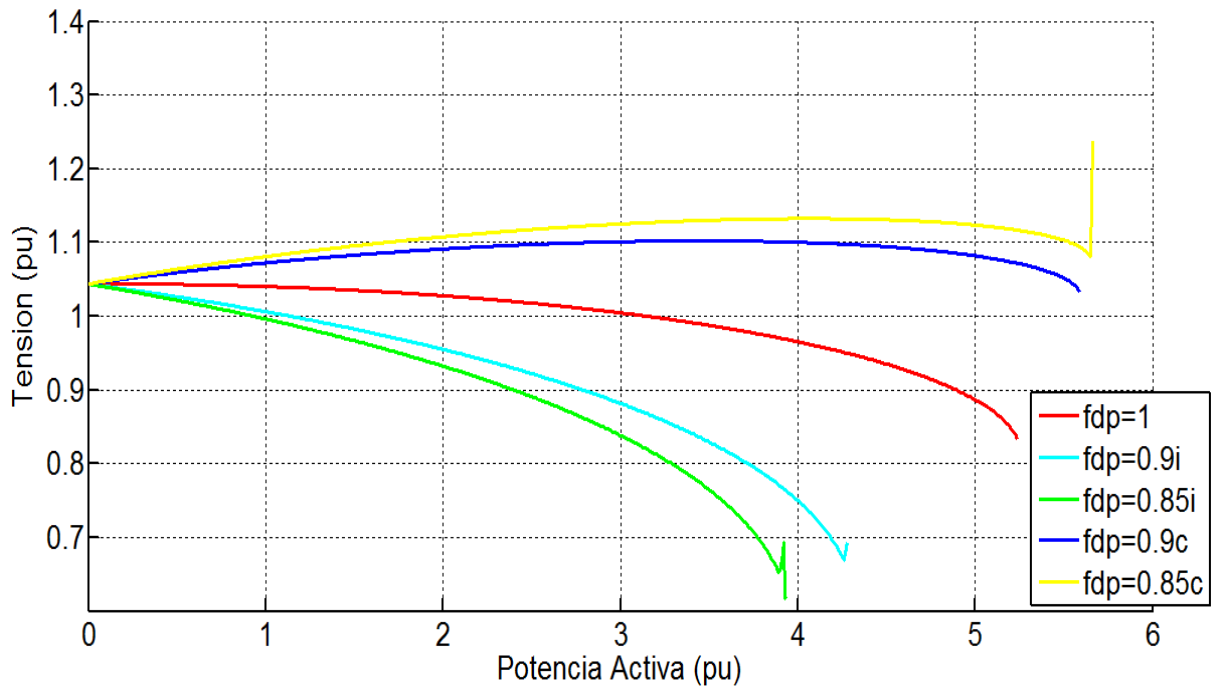


Figura 6.10. Gráfica PV o de nariz para el nudo 8 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.

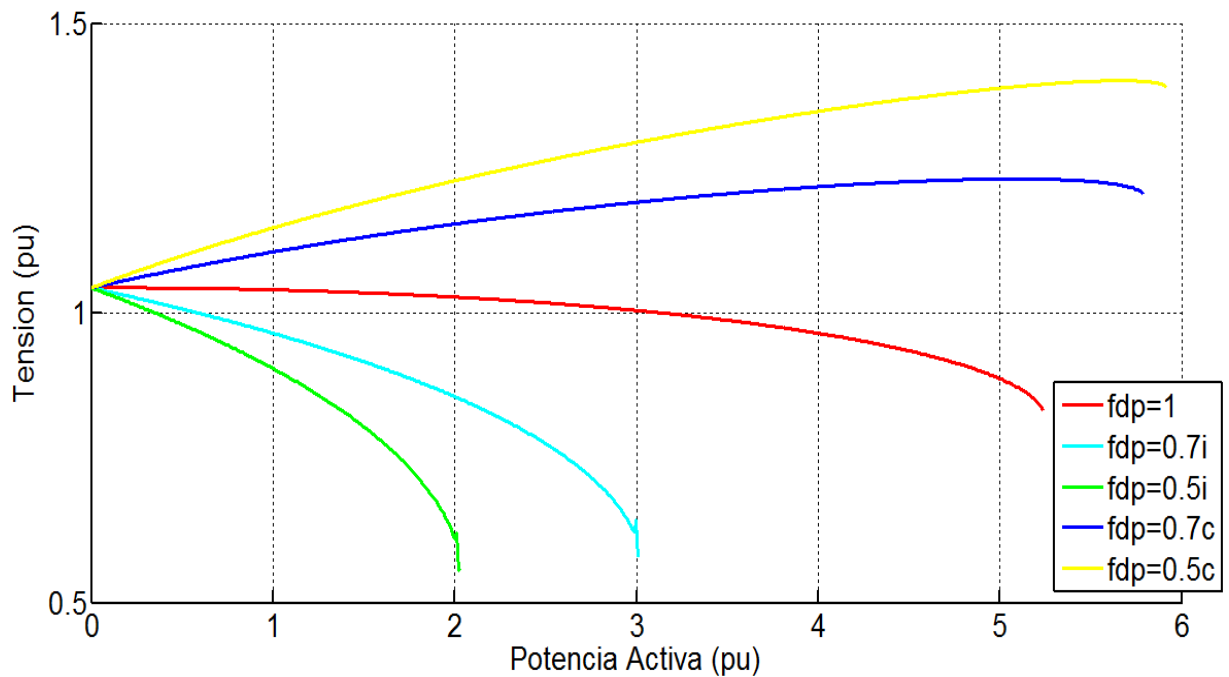


Figura 6.11. Gráfica PV o de nariz para el nudo 8 del sistema estudiado cuando no hay transformador regulador en el sistema.

Se aprecia que el nudo 8 es más difícil a la hora de predecir su nivel de estabilidad, ya que varía con respecto a los otros nudos dependiendo del factor de potencia. Será necesaria una tabla comparativa como la **Tabla 6.1**.

Tabla 6.1 Tabla comparativa de la estabilidad de los nudos ante diferentes factores de la carga en dichos nudos cuando no hay transformador regulador.

$f_{dp} = \cos\varphi$	Orden de inestabilidad (Más a menos)
1	Nudo 6 → Nudo 8 → Nudo 5
0.98 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8
0.95 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8
0.90 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8
0.85 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8
0.70 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8
0.50 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8
0.98 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5
0.95 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5
0.90 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5
0.85 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5
0.70 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5
0.50 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5

Se aprecia con claridad lo siguiente:

- **$f_{dp} = 1$:**
 - El nudo más crítico es el nudo 6.
 - El nudo menos crítico es el nudo 5.
- **$f_{dp} = \text{inductivo}$:**
 - El nudo más crítico es el nudo 6.
 - El nudo menos crítico es el nudo 8.
- **$f_{dp} = \text{capacitivo}$:**
 - El nudo más crítico es el nudo 8.
 - El nudo menos crítico es el nudo 5.

La variación de la criticidad depende de si la carga analizada entrega potencia reactiva, no entrega nada o bien absorbe potencia reactiva. Dado que en el sistema del caso base estudiado, las tres cargas del sistema eran inductivas (absorbían potencia activa y reactiva del sistema), podemos considerar que el orden del nudo más crítico al nudo menos crítico del sistema es:

Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8.

Este orden se basa en el momento en el que se pierde la estabilidad del sistema, que es cuando el método iterativo Newton Raphson no converge y no se puede alcanzar ninguna solución. Aunque en un primer momento se había considerado el nudo 5 como el más crítico, debido a que su tensión era la más pequeña en módulo, con estas gráficas se ha podido verificar que no es así. También es posible visualizar en las gráficas de nariz que cuanto antes se pierde la estabilidad, los módulos de las tensiones son más bajos. Estos son del orden de 0.65 – 0.75 en por unidad cuando se vuelve el sistema inestable en condiciones inductivas. Concluyendo con el análisis sin transformador regulador se llega a las siguientes conclusiones:

- Nudo más crítico en condiciones inductivas: **Nudo 6**.
- Nudo menos crítico en condiciones inductivas: **Nudo 8**.
- Cuanto menor es el factor de potencia inductivo, más inestable es el sistema y cuanto menor es el factor capacitivo, el sistema es más estable.
- El sistema se vuelve inestable cuando el método Newton Raphson no converge en el algoritmo utilizado. Si aumentásemos las iteraciones máximas los resultados de las tensiones podrían no ser precisos.
- La inyección de reactiva en un nudo aumenta el módulo de la tensión. Al contrario, disminuirá el módulo en dicho nudo.

6.2 ANÁLISIS CON TRANSFORMADOR REGULADOR LTC.

En este apartado se llevará a cabo el mismo análisis pero con la regulación del nudo 5 mediante el transformador de tomas variables regulador de módulo o LTC. Se obtendrán las curvas PV respectivas teniendo en cuenta que al estar manteniendo la tensión en el nudo 5 en un valor fijo, la curva será constante hasta cierto valor de la potencia en la cual caiga.

6.2.1 Nudo 5.

- **Algoritmo en Matlab®.**

En este análisis se utilizará la función llamada AnalisisPV1 del Anexo IV. Esta función será igual que la creada en apartados anteriores, simplemente que se incluirá en el algoritmo del transformador LTC utilizado anteriormente.

Desde esa función se llamará a la función ProgramaPrincipal del mismo modo ya descrito. La variable *PCARGAvariable* y *QCARGAvariable* se asignarán al nudo 5.

- **Gráficas PV nudo 5.**

Al igual que en el caso anterior sin transformador regulador, se van a realizar tres gráficas con distintos factores de potencia. La **Figura 6.12** tendrá valores cercanos a la unidad (1, 0.98i, 0.95i, 0.98c y 0.95c). La **Figura 6.13** representará factores de potencia un poco más lejanos (1, 0.9i, 0.85i, 0.9c y 0.85c). Por último, la **Figura 6.14** tendrá factores de potencia más pequeños (1, 0.7i, 0.5i, 0.7c y 0.5c).

En primer lugar se tiene la **Figura 6.12**.

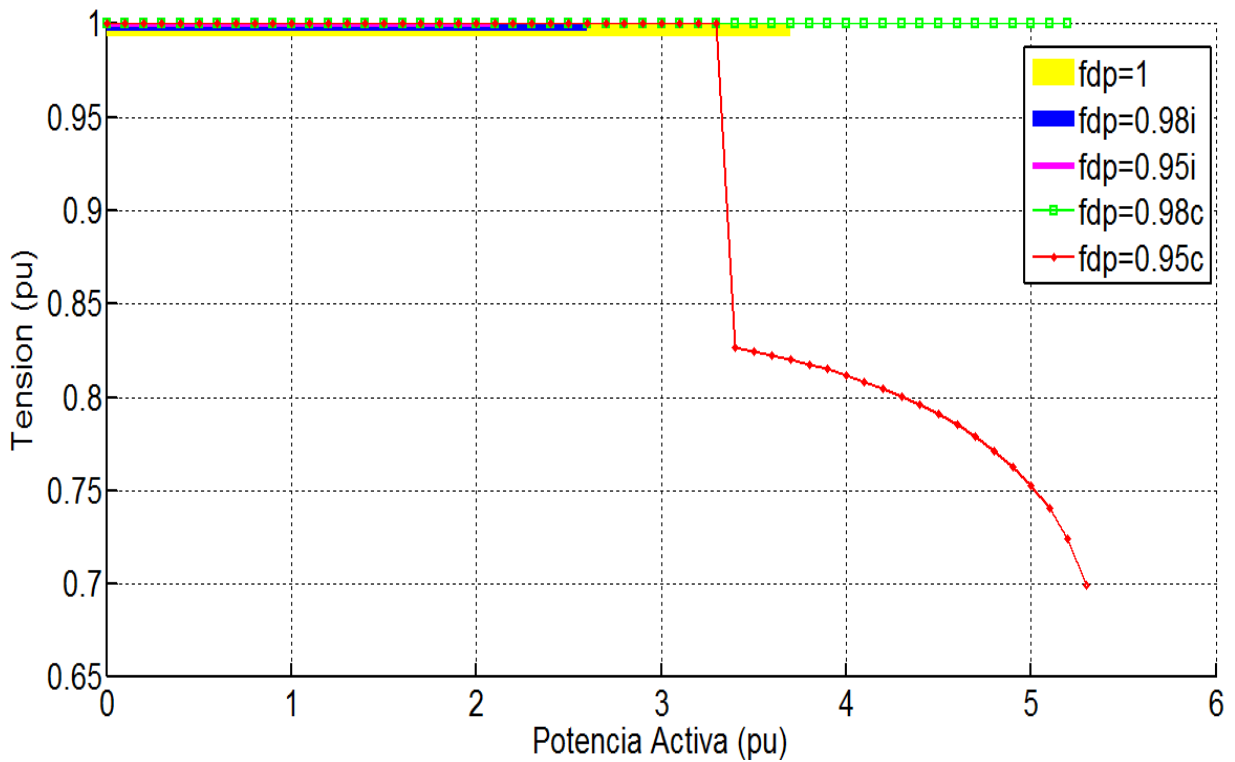


Figura 6.12. Gráfica de nariz o PV para el nudo 5 controlado por el transformador regulador LTC en el sistema estudiado

A continuación se tiene la **Figura 6.13**.

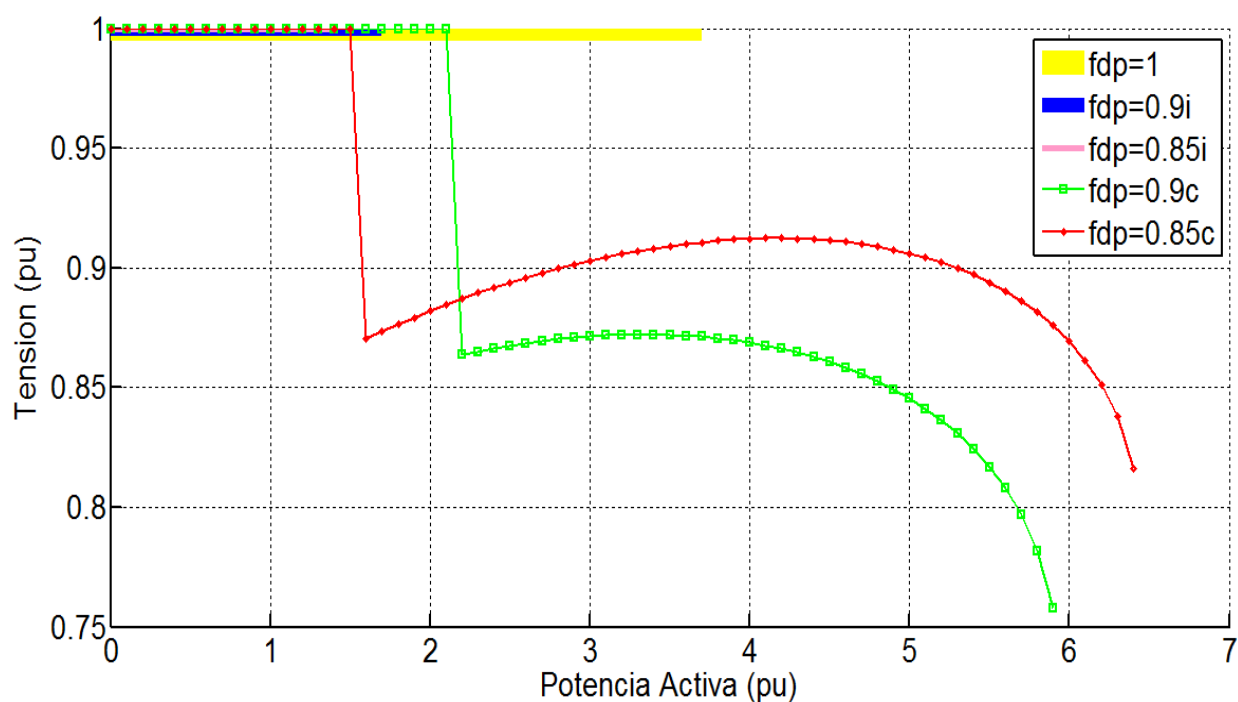


Figura 6.13. Gráfica de nariz o PV para el nudo 5 controlado por el transformador regulador LTC en el sistema estudiado

Por último se tiene la **Figura 6.14**.

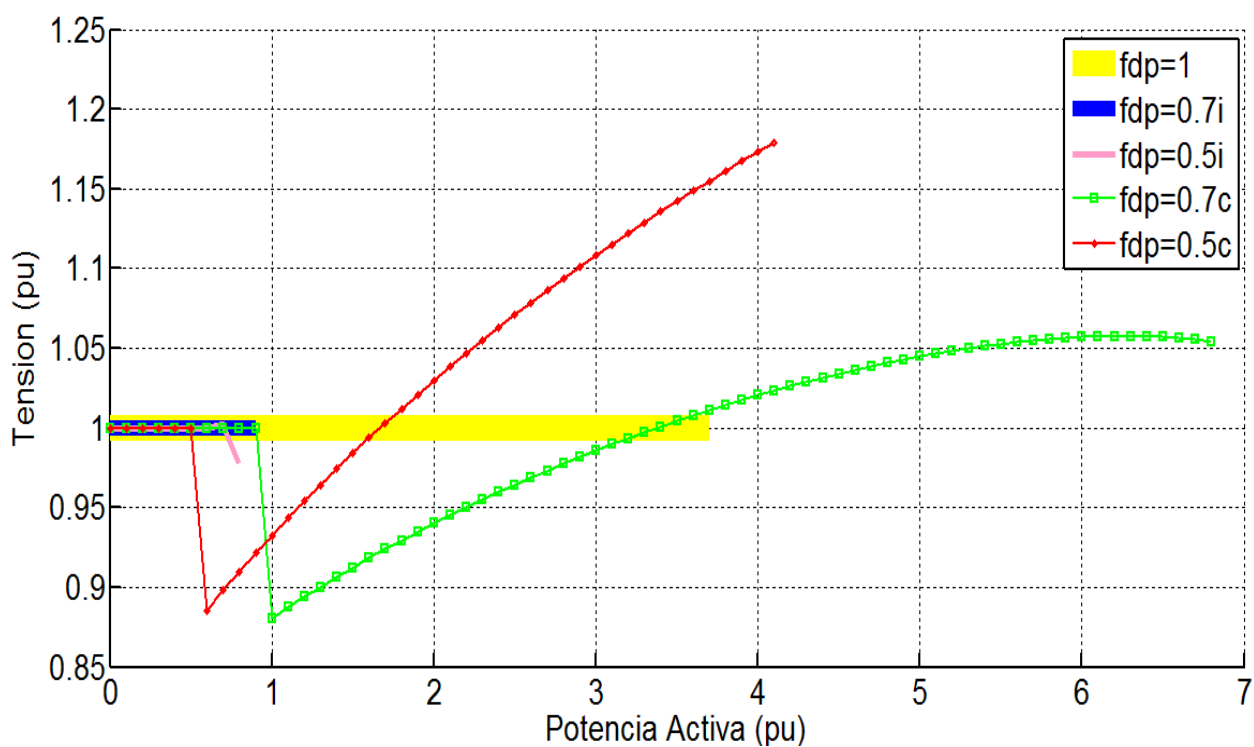


Figura 6.14. Gráfica de nariz o PV para el nudo 5 controlado por el transformador regulador LTC en el sistema estudiado

Como se esperaba, la tensión en el nudo 5 (nudo controlado por el transformador regulador del módulo) se mantiene en 1 en por unidad hasta cierto punto. En ese punto, dependiendo de qué factor de potencia se esté absorbiendo en la carga, sucederá una cosa u otra.

- Para el caso de los factores inductivos, en los cuales se pierde la estabilidad antes que en los capacitivos, la inestabilidad se da antes de que el transformador llegue a su toma máxima o mínima. Para el caso de factor de potencia unidad pasa lo mismo. Esto ocurre en todos los factores inductivos menos en el *0.5 inductivo*, en el cual la inestabilidad se da un poco después de que se pierda la tensión de *1 pu*. Este factor es el que tiene una mayor inestabilidad de todos. Este fenómeno puede deberse a un error de cálculo.
- En el caso de los factores capacitivos, al perderse la estabilidad después que los anteriores, se puede ver en las gráficas como la tensión se mantiene en el valor requerido hasta un punto que cae a un valor y luego se sigue dibujando la curva PV o curva de nariz. Ese punto es el momento en el que el transformador regulador no puede seguir controlando la tensión en dicho nudo. El único factor capacitivo que pierde la estabilidad antes que llega a su toma máxima o mínima es *0.98 capacitivo* dado que es el que antes llega a la inestabilidad. Además, en el caso de ser capacitiva la carga, es posible mantener la tensión en el valor requerido de 1 pu a más potencia activa absorbida debido a la inyección de potencia reactiva desde la carga.

En cuanto se pierde el control de la tensión, las gráficas se comportan de una forma muy parecida a cuando no existe un transformador regulador para el caso de cargas capacitivas. Para el caso de cargas inductivas no es así. Si comparamos estas gráficas con las anteriores (sin transformador regulador), la estabilidad es menor cuando queremos controlar la tensión en un nudo del sistema. El sistema se vuelve inestable a menores potencias activas absorbidas por la carga debido a que se está controlando un nudo del sistema y eso requiere mayor inyección de potencia reactiva en dicho nudo. Esto sucede tanto si es capacitiva la carga, tanto como si es inductiva.

- **Graficas Toma vs Potencia activa.**

A continuación se analizarán los cambios de la toma del transformador LTC con respecto al aumento de la potencia activa del sistema. El código ha cambiado levemente con respecto al de las otras gráficas. Este código viene descrito en el Anexo V. La función será AnalisisPT. El cambio principal es que el vector en el cual se guardaban los módulos de tensiones cambia para guardar la toma del transformador para cada potencia activa absorbida y para cada factor de potencia

En primer lugar se tiene la **Figura 6.15** que muestra la posición de la toma del transformador LTC con respecto a la potencia activa absorbida por la carga del nudo 5, con distintos factores de potencia cercanos a la unidad.

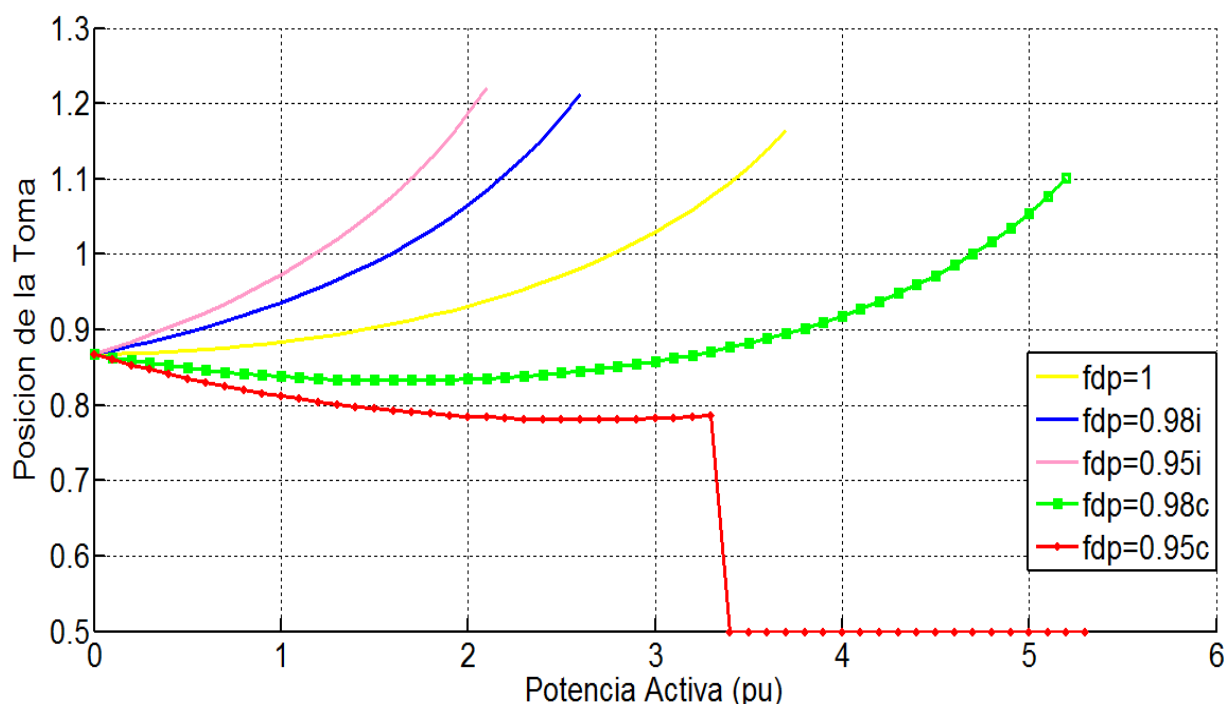


Figura 6.15. Gráfica de la posición de la toma del transformador regulador con respecto a la potencia activa absorbida en la carga.

A continuación en la **Figura 6.16** se muestran factores de potencia mas lejanos a la unidad pero sin llegar a ser extremos.

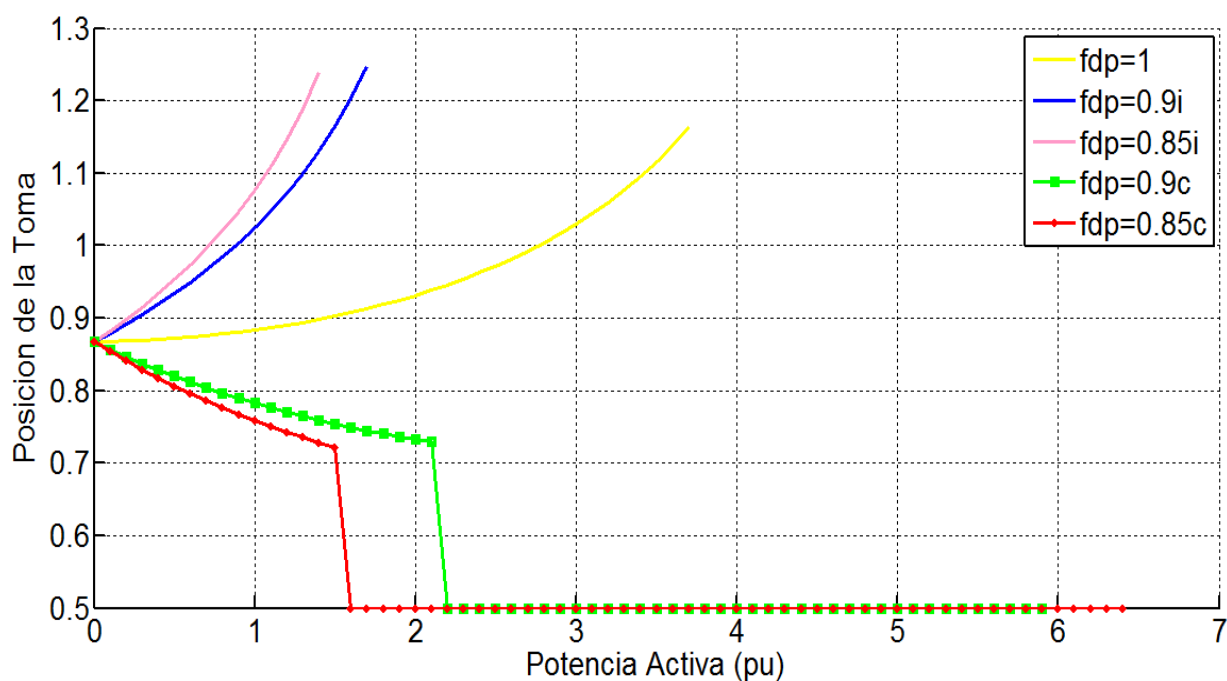


Figura 6.16. Gráfica de la posición de la toma del transformador regulador con respecto de la potencia absorbida en la carga.

Por último en la **Figura 6.17** se muestran valores mas lejanos a la unidad.

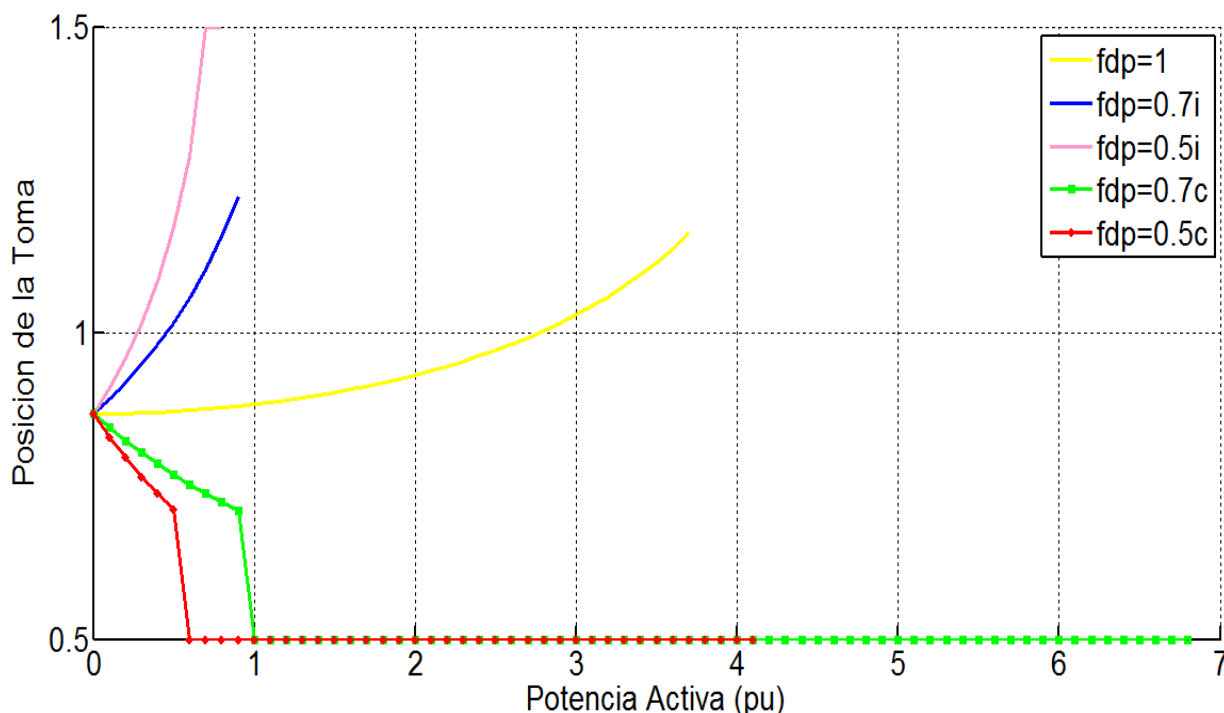


Figura 6.17. Gráfica de la posición de la toma del transformador regulador con respecto de la potencia absorbida en la carga.

Con las tres figuras anteriores que muestran la toma del transformador con respecto de la potencia activa absorbida por la carga se llega a las siguientes conclusiones.

- Cuando la carga presenta factor de potencia inductivo:
 - Se pierde la estabilidad antes de que se llegue a la toma máxima o mínima.
 - La toma aumenta a medida que la tensión va disminuyendo.
 - La tensión va disminuyendo a medida que la potencia activa absorbida aumenta.
 - La gráfica termina cuando se ha perdido la estabilidad.
 - El control de la tensión se mantiene en todo momento hasta la pérdida de la estabilidad.
 - La estabilidad se pierde antes que para el caso sin transformador regulador.
- Cuando la carga presenta factor de potencia unidad:
 - Ocurre lo mismo que para el factor de potencia inductivo.

- La única diferencia es que soporta más potencia activa absorbida por la carga.
- Cuando la carga presenta factor de potencia capacitivo:
 - Si el factor de potencia capacitivo es alto (aproximadamente 0.98 c), el comportamiento es igual que el caso del factor inductivo. En este caso la toma disminuye un poco y luego aumenta.
 - Si el factor capacitivo es bajo:
 - La toma disminuye primero y luego aumenta debido a que la tensión aumenta primero y luego disminuye.
 - Para el caso de factores muy bajos, la toma solo disminuye ya que la tensión solo aumenta.
 - Se consigue llegar al límite de toma mínima que es 0.5 (tensión va aumentando).
 - Después, el valor se establece en la toma mínima y se pierde el control de la tensión.
 - La tensión a partir de ese punto se comporta como para el caso de no existir un transformador regulador.
 - La estabilidad también se pierde antes que cuando no había transformador regulador.

6.2.2 Nudo 6.

Este nudo no está controlado por el transformador LTC, sin embargo se va a estudiar su estabilidad de nuevo con la existencia del LTC en el sistema. Se presentaran las tres figuras correspondientes.

- **Algoritmo en Matlab®.**

El único cambio a realizar respecto al algoritmo de AnálisisPV1 será el índice del módulo de la tensión que pasará a ser el del nudo 6 en vez de el del 5. El código será el del Anexo IV. También se asignara la variable *PCargavariante* y *QCargavariante* a la carga del nudo 6 que es la carga número 2. Esta función llamará al ProgramaPrincipal del algoritmo con el transformador LTC sucesivas veces para cada incremento de potencia activa.

- **Graficas PV del nudo 6.**

La primera gráfica será la **Figura 6.18**.

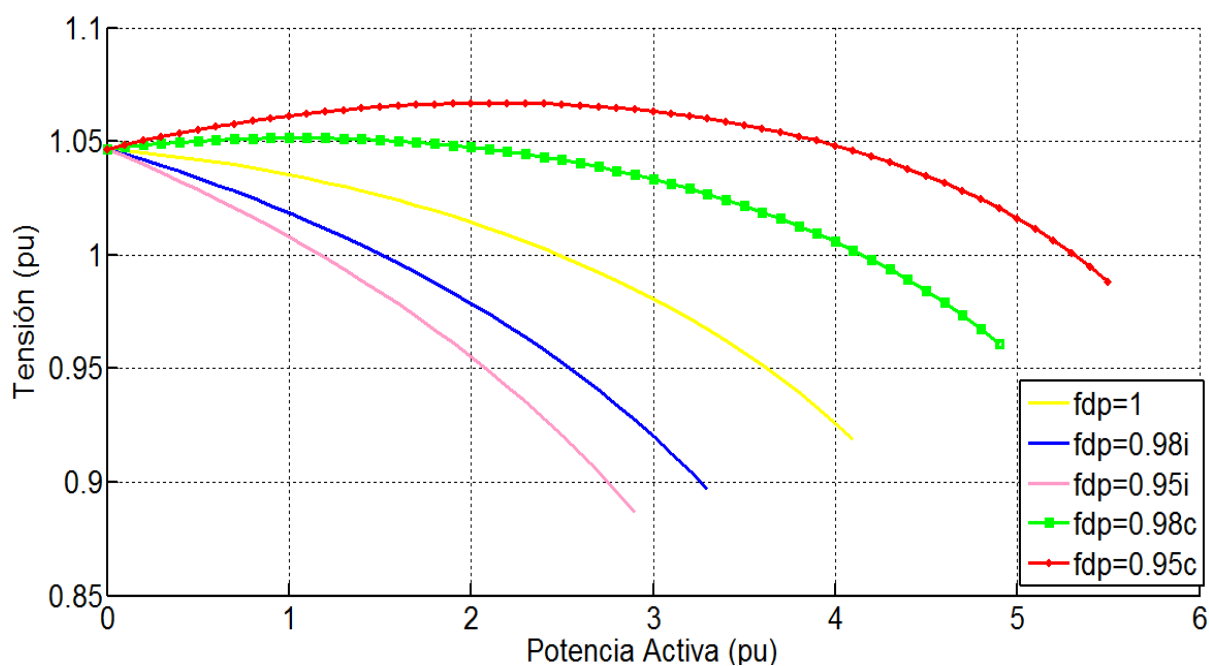


Figura 6.18. Gráfica de PV o de nariz del nudo 6 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5. (LTC)

A continuación se tiene la **Figura 6.19**.

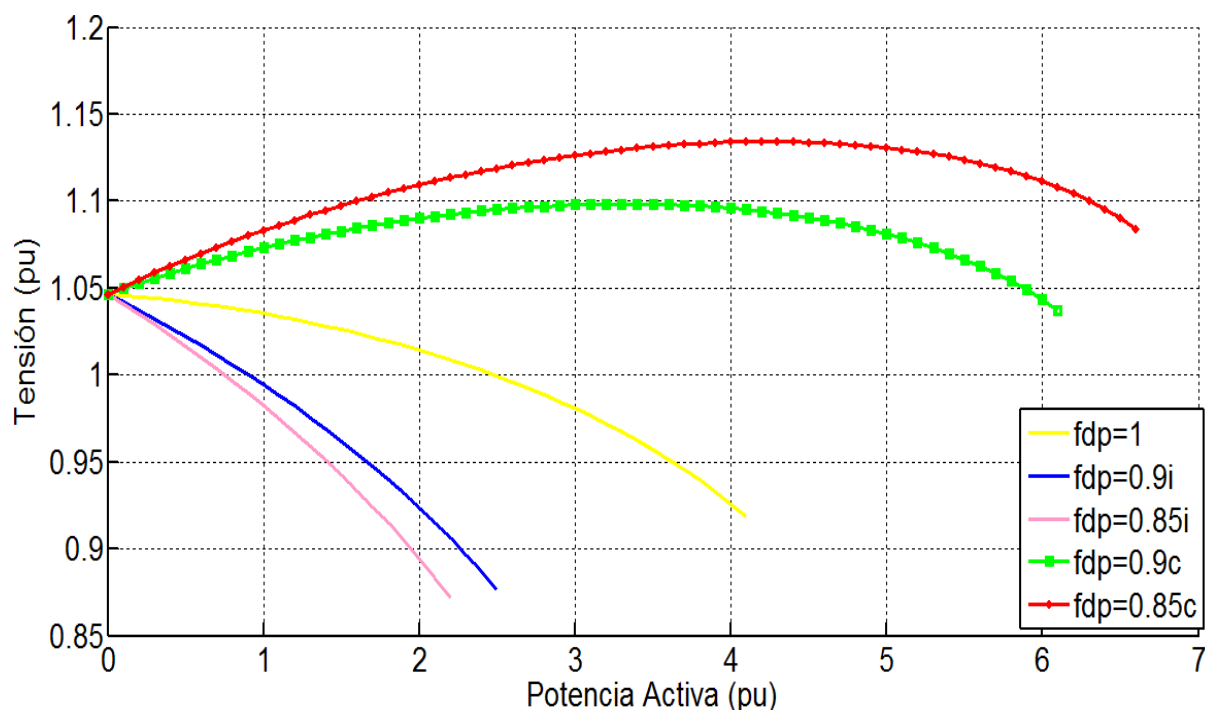


Figura 6.19 Gráfica de PV o de nariz del nudo 6 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC)

Por último la **Figura 6.20**.

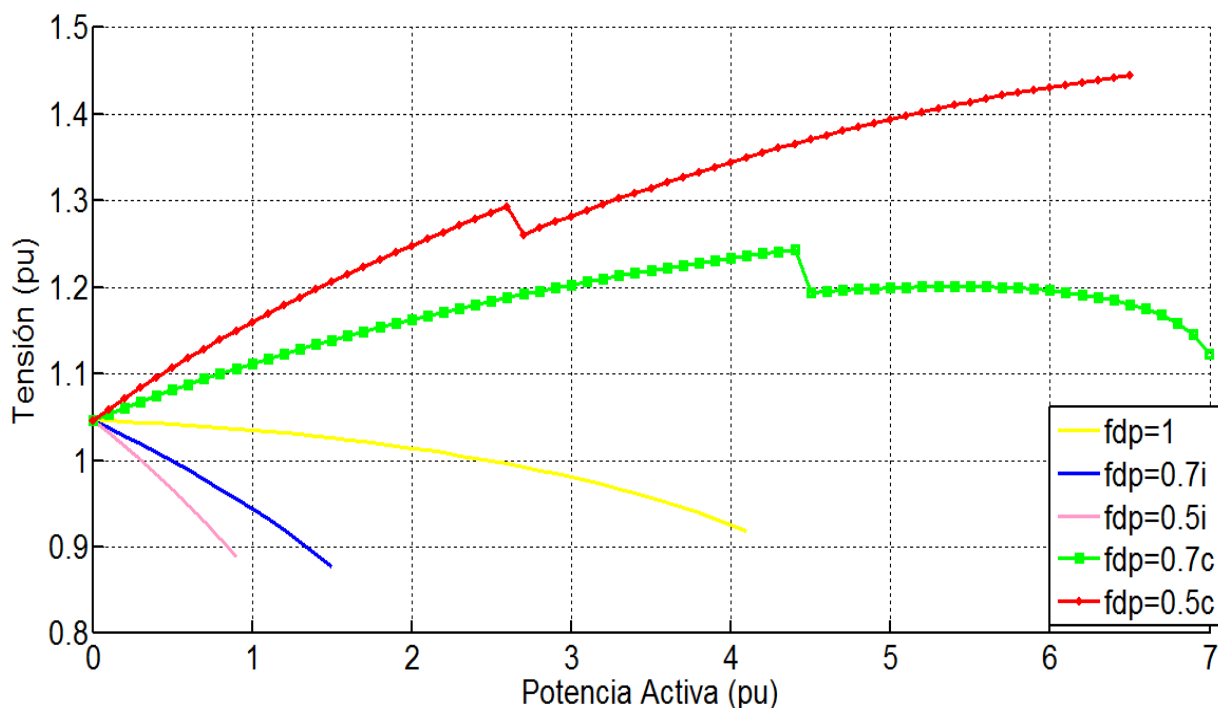


Figura 6.20. Gráfica de PV o de nariz del nudo 6 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC)

6.2.3 Nudo 8.

Este será el último nudo a analizar cuando hay un transformador LTC en el sistema. Se llevarán a cabo las mismas gráficas que en los casos anteriores.

- **Algoritmo en Matlab®.**

Al igual que en los otros casos, se cambiará el índice del módulo de la tensión y las variables de potencia activa y reactiva. El mismo algoritmo será el utilizado disponible en el Anexo IV.

- **Graficas PV del nudo 8.**

En primer lugar se tiene la **Figura 6.21** con los factores de potencia cercanos a la unidad. En segundo lugar la **Figura 6.22**. Por último, se representarán los factores lejanos al factor de potencia unidad en la **Figura 6.23**.

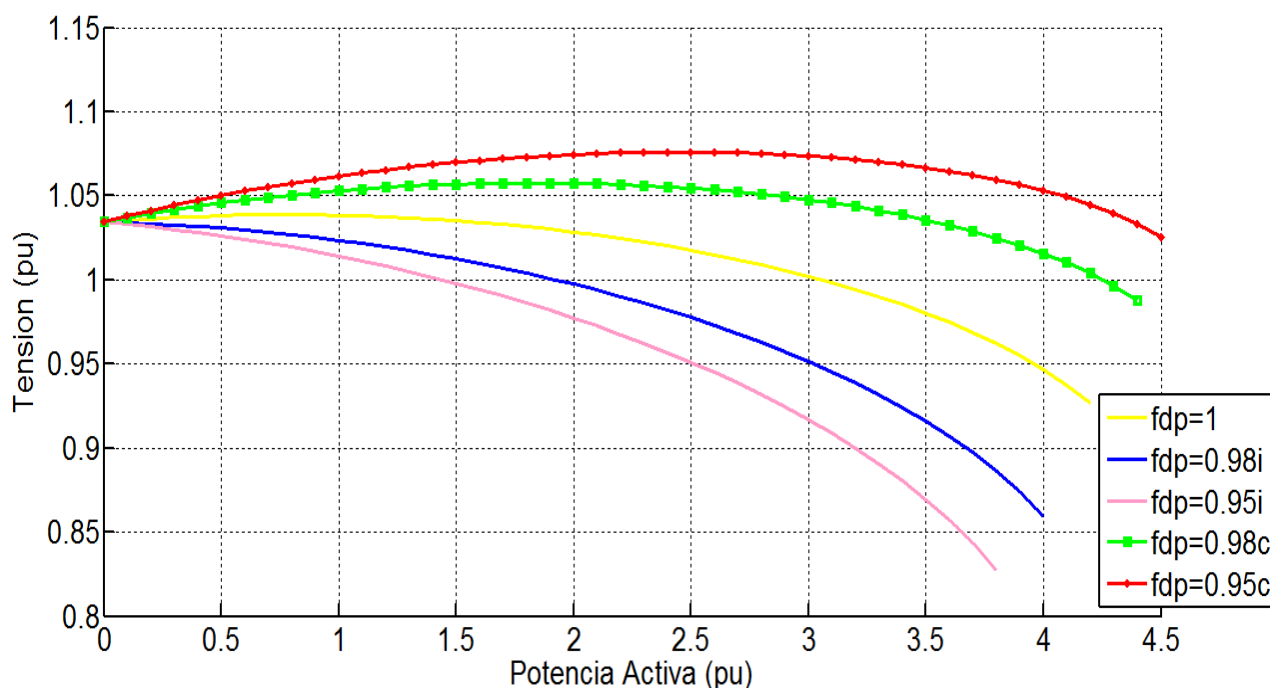


Figura 6.21 Gráfica de PV o de nariz del nudo 8 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC).

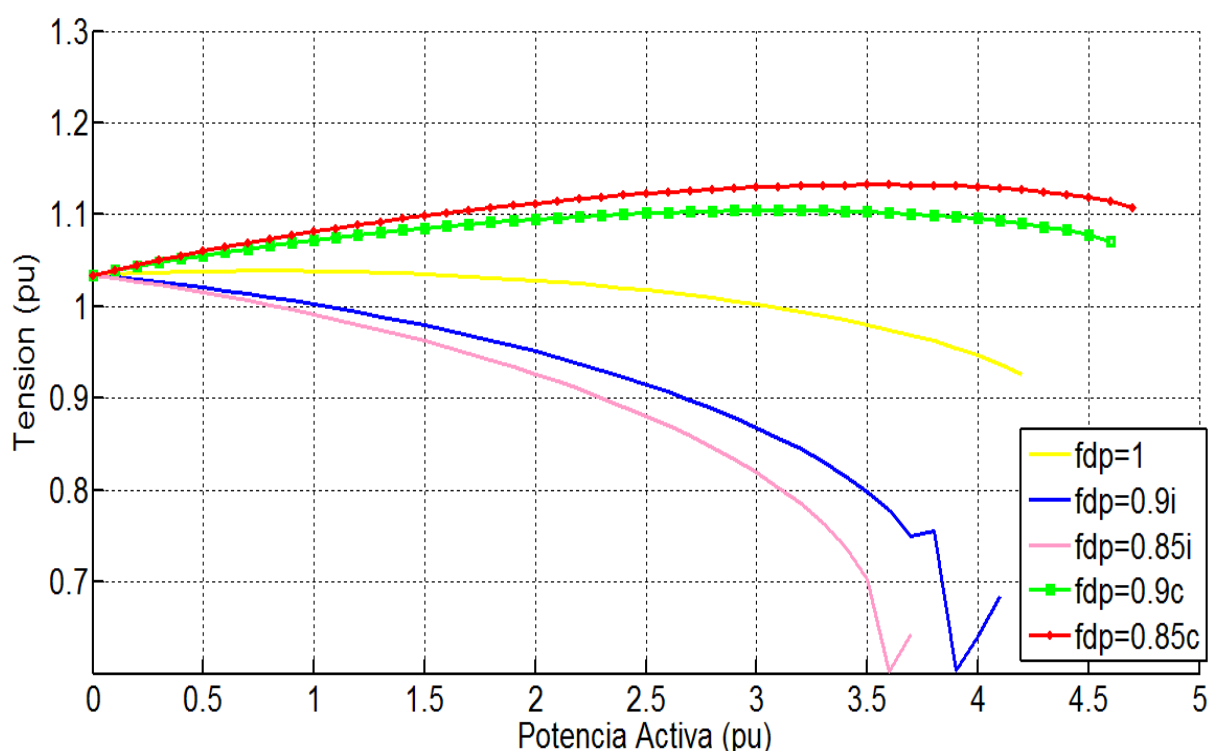


Figura 6.22. Gráfica de PV o de nariz del nudo 8 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC) con otros factores de potencia.

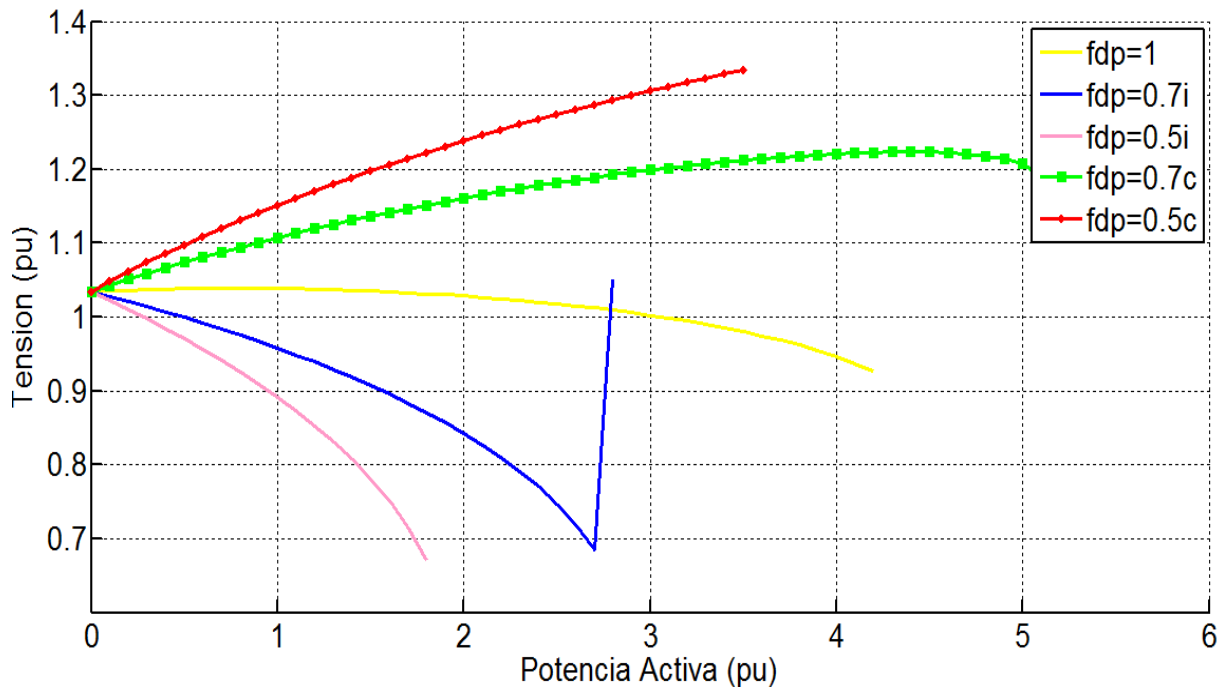


Figura 6.23. Gráfica de PV o de nariz del nudo 8 del sistema cuando hay un transformador regulador que controla el nudo 5 (LTC).

A continuación se llevará a cabo una comparación entre los tres nudos estudiados con el transformador regulador de módulo o LTC para ver que nudos son más críticos o más inestables.

Tabla 6.2. Tabla comparativa de la estabilidad de los nudos ante diferentes factores de la carga en dichos nudos cuando hay un transformador regulador que controla la tensión en el nudo 5.

$f_{dp} = \cos\varphi$	Orden de inestabilidad (Más a menos)
1	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.98 inductivo	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.95 inductivo	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.90 inductivo	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.85 inductivo	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.70 inductivo	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.50 inductivo	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.98 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.95 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.90 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.85 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.70 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.50 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6

En la **Tabla 6.3** se muestra la comparación de la estabilidad de los nudos cuando hay un transformador regulador LTC y cuando no lo hay.

Tabla 6.3. Tabla comparativa de la estabilidad de los nudos entre el sistema sin transformador LTC y con transformador LTC que regula el nudo 5.

$f_{dp} = \cos\phi$	Orden de inestabilidad (Más a menos) sin LTC	Orden de inestabilidad (Más a menos) con LTC
1	Nudo 6 → Nudo 8 → Nudo 5	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.98 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.95 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.90 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.85 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.70 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.50 inductivo	Nudo 6 → Nudo 5 → Nudo 8	Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8
0.98 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.95 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.90 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.85 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.70 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6
0.50 capacitivo	Nudo 8 → Nudo 6 → Nudo 5	Nudo 8 → Nudo 5 → Nudo 6

Se concluye que:

- $f_{dp} = 1$:
 - El orden de estabilidad ya no es el mismo que en el caso de no existir un transformador regulador en el sistema.
 - El nudo más crítico pasa a ser el nudo 5 (nudo a controlar) y antes era el nudo 6.
 - El nudo menos crítico ahora es el nudo 8 y antes era el 5.
- $f_{dp} = \text{inductivo}$:
 - El orden tampoco coincide con el primer caso sin transformador regulador.
 - El nudo más crítico es el nudo 5 ahora y antes era el 6. Cambian lugares.
 - El nudo menos crítico es el nudo 8 y antes también.
- $f_{dp} = \text{capacitivo}$:
 - El nudo más crítico sigue siendo el nudo 8 en ambos casos.
 - El nudo menos crítico pasa a ser el 6 y antes era el 5.

Esto puede ser debido a que el nudo 5 es el controlado, requiere buena inyección de potencia reactiva, y no consigue mantener la estabilidad mucho tiempo. Se ve que al controlar dicho nudo, ha aumentando mucho la criticidad. Dado que en el sistema del caso base estudiado con el transformador regulador LTC, las tres cargas del sistema eran inductivas, podemos considerar que el orden del nudo más crítico al nudo menos crítico del sistema es:

Nudo 5 → Nudo 6 → Nudo 8.

Resumiendo:

- Nudo más crítico en condiciones inductivas con LTC: **Nudo 5.**
Se ve que la estabilidad disminuye al querer mantener la tensión en un determinado valor el mayor tiempo posible con el aumento de la potencia activa.

6.2.4. Análisis Caso base.

En este apartado se van a analizar los casos base estudiados en los Apartados **5.1** y **5.2**. En el caso base el nudo 5 absorbía una carga de:

$$P \text{ (Potencia activa)} = 1.25 \text{ pu}$$

$$Q \text{ (Potencia reactiva)} = 0.5 \text{ pu}$$

Esto es un factor de potencia de:

$$\frac{Q}{P} = \frac{U \times I \times \sin\varphi}{U \times I \times \cos\varphi} = \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} = \tan\varphi = \frac{0.5}{1.25} = 0.4$$

$$\varphi = \tan^{-1}(0.4) = 0.3805 \text{ radianes}$$

$$\underline{\underline{\cos\varphi = 0.92848 \sim 0.93}}$$

En la **Figura 6.24** se muestra la gráfica PV del sistema del caso base sin transformador LTC en el nudo 5. En la **Figura 6.25** se muestra la misma gráfica para el nudo 5 pero cuando el transformador LTC está controlando la tensión en dicho nudo.

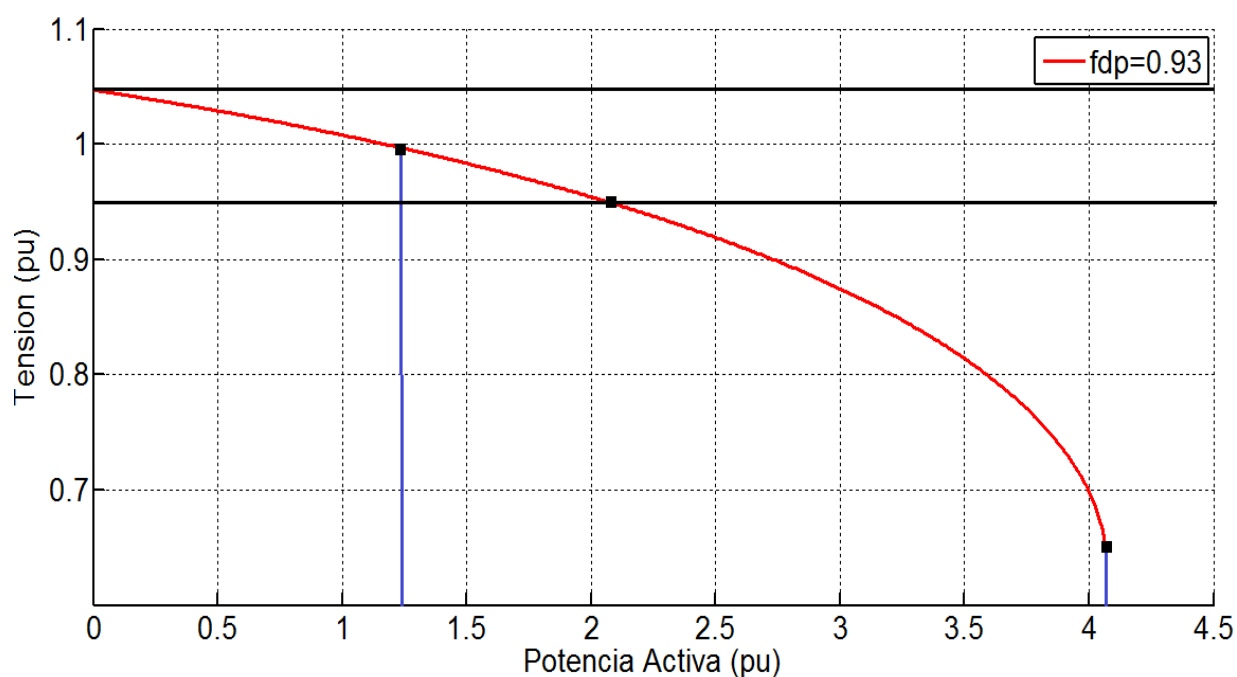


Figura 6.24 Gráfica PV del nudo 5 sin transformador regulador LTC con factor de potencia del caso base y límites adecuados señalizados (0.95-1.05 pu).

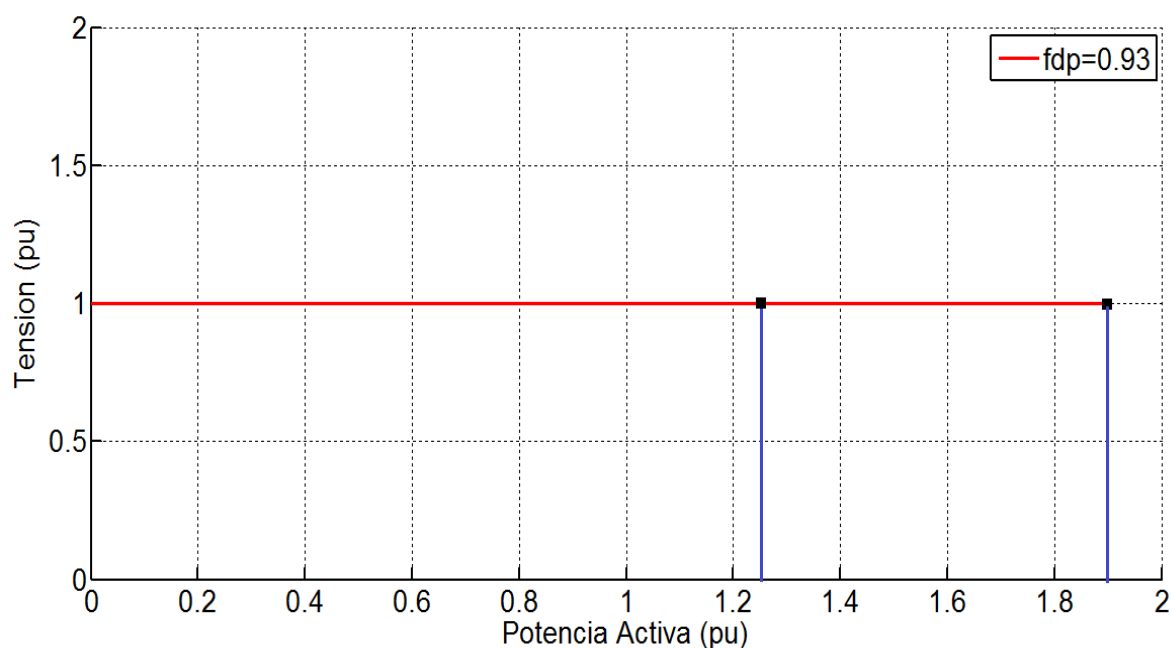


Figura 6.25. Gráfica PV del nudo 5 con transformador regulador LTC con factor de potencia del caso base.

Por lo tanto, como ya se ha mencionado anteriormente, al querer mantener la tensión en un determinado valor en el nudo 5. El sistema soporta menos potencia activa y se vuelve inestable antes.

Se concluye:

1. En la primera gráfica se ve que la tensión disminuye rápidamente hasta $0.65 pu$ en el cual el sistema se vuelve inestable. El valor de potencia activa en el cual la tensión baja de $1 pu$ cuando no hay LTC es $1.25 pu$.
2. El valor de potencia activa cuando hay LTC en el cual la tensión deja de ser $1 pu$ ya que se pierde la estabilidad es $1.9 pu$. Por lo cual, gracias al transformador LTC se puede mantener la tensión de $1 pu$ más tiempo. Por ello el control es bueno aunque las pérdidas sean mayores como se ha mencionado anteriormente.

7. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Con este último capítulo concluye el proyecto, y por eso, se van a nombrar las principales conclusiones que se han sacado a partir del análisis realizado. También, como pasa en la mayoría de los proyectos, siempre se puede mejorar de alguna forma el estudio realizado o aportar más información. Por ello, se van a nombrar una serie de mejoras que completarían el trabajo y aportarían un análisis mucho más exacto del tema concerniente.

En primer lugar, se concluye que el flujo de potencia es una buena herramienta para la resolución del flujo en un sistema. El método utilizado (Newton-Raphson) ha demostrado ser un método muy eficaz y rápido a la hora de aportar soluciones. También los valores proporcionados se consideran buenos en cuanto a exactitud y es por ello que ha sido una elección adecuada. En cuanto al tema de la estabilidad de tensión, las gráficas PV realizadas proporcionan un método que aporta una visión clara del concepto y fácil de entender a la hora de analizar dicha estabilidad.

En cuanto al tema concerniente de este trabajo que son los transformadores reguladores, bien de módulo o bien de fase. Se ha demostrado que son efectivos a la hora de realizar su función de regulación. Si bien el transformador regulador de fase no tiene un intervalo amplio para regular la potencia activa (cambios de sentido) se aprecia que puede controlar dicha potencia en un intervalo bueno. En cuanto al transformador regulador de módulo al cual se le ha dado más importancia, cabe destacar su buen control de la tensión. Y aunque las pérdidas totales del sistema aumentaban al controlar la tensión de un determinado nudo, la función se llevaba a cabo correctamente. En cuanto al análisis de la estabilidad de la tensión con dicho transformador, se ha concluido que al ir aumentando la potencia consumida en la carga, la tensión se mantenía en el valor requerido por más tiempo que en el caso de que no hubiese transformador regulador. Por esto, los transformadores reguladores son un medio muy utilizado hoy en día a la hora del control del flujo de potencia o de mantener un nivel de tensión en un determinado nudo.

En este trabajo se pueden plantear una serie de mejoras que proporcionarían un análisis más preciso del tema. Se podía haber profundizado en el funcionamiento interno de los transformadores reguladores y de cómo son capaces de llevar a cabo su función. También, a la hora de simular el sistema de este proyecto con sus respectivos datos, no se ha tenido en cuenta los límites de carga de las líneas de transporte y es un tema que valdría la pena estudiar en el futuro. Debido a la longitud del trabajo no se ha podido llevar a cabo dichas mejoras pero se tendrá en cuenta para futuros trabajos.

8. PLANIFICACIÓN

En este capítulo se describe la planificación seguida para llevar a cabo el trabajo de fin de grado realizado. A continuación se muestra la **Tabla 8.1** en la cual se nombran las actividades realizadas y las fechas en las cuales han tenido lugar. La planificación es un medio excelente para que los proyectos a realizar puedan acabar en las fechas propuestas o pedidas inicialmente. Es importante dejar un intervalo de tiempo antes de la fecha de fin de proyecto por si se dan problemas que puedan retrasar dicho proyecto.

Tabla 8.1. Actividades llevadas a cabo para la realización del trabajo de fin de grado.

ACTIVIDAD	FECHA DE COMIENZO	FECHA DE FIN
Busqueda de tutor y de tema para el trabajo de fin de grado.	20 de noviembre	15 de diciembre
Busqueda de información sobre el tema a tratar.	25 de enero	12 de febrero
Ejecución de los algoritmos para los flujos de potencia analizados en este trabajo. (Anexo I, II y III)	20 de febrero	15 de abril
Busqueda de sistema electrico a analizar posteriormente.	20 de abril	23 de abril
Análisis de los resultados obtenidos y aprobación de la elección del nuevo sistema.	23 de abril	27 de abril
Redacción de la memoria del trabajo de fin de grado.	25 de mayo	26 de agosto
Realización de los algoritmos para la representación de las gráficas PV para el análisis de la estabilidad de tensión. (Anexos IV y V)	20 de junio	5 de julio
Revisión de la memoria en busca de fallos ortográficos o de conceptos.	1 de septiembre	20 de septiembre
Entrega del trabajo de fin de grado.	23 de septiembre	27 de septiembre

9. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] GOMEZ EXPÓSITO, Antonio. Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica. Mc Graw Hill. 2002. Aravaca (Madrid). 769 p.
- [2] https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_trif%C3%A1sico. Visitado del día 8 de Abril.
- [3] <http://todoproduktividad.blogspot.com.es/2012/09/ventajas-y-aplicaciones-de-los-sistemas.html>. Visitado el día 8 de abril.
- [4] <http://blog.nuestroclima.com/blog/2014/10/17/inversion-de-los-polos-magneticos-de-la-tierra/red-electrica>. Visitado el día 8 de abril.
- [5] GLOVER, J.Duncan. SARMA, Mulukutla S. OVERBYE, Thomas J. Power system analysis and design. Thomson. 4th edition.
- [6] ACHA, Enrique. FUERTE-ESQUIVEL, Claudio R. AMBRIZ-PÉREZ, Hugo. ANGELES-CAMACHO, Cesar. FACTS. Modelling and Simulation in Power Networks. John Wiley and sons, LTD. Inglaterra. 2004. 403 p.
- [7] MOHAN, Ned. First Course on Power Systems. MNPERE. 2006.
- [8] KUNDUR, Prabha. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc. 1994. 1º Edición- 1176 p. Biblioteca Politécnica Universidad Carlos III de Madrid.
- [9] Diapositivas Universidad Carlos III de Madrid. Estabilidad de tensión. Simulación de sistemas eléctricos por ordenador. Visitado: 24 de junio 2015.
- [10] http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos/II_OCSE_RT/node18.html. Visitado el día 23 de junio de 2015.
- [11] <http://www.transformadoreselectricosweg.com/transformadores-de-potencia.html>. Visitado el día 8 de Abril de 2015.
- [12] GRAINGER, John J. STEVENSON Jr, William D. Power System Analysis. Primera edición. McGraw-Hill, Inc. Unites States of America. 1994. 787 p. ISBN: 0 07 061293 5.
- [13] STEVENSON Jr, William D. Elements of Power System Analysis. Cuarta edición. McGraw-Hill. Singapur. 1982. 429 p. ISBN: 0 07 066584 2.
- [14] W. SAUER, Peter. PAI, M. A. Power system dynamics and stability. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey. 1998.

ANEXO I. ALGORITMO EN MATLAB DE FLUJO DE POTENCIA SIN TRANSFORMADOR REGULADOR.

```
function
[nbb,tipobus,VM,VA,ngn,nudogen,PGEN,QGEN,QMAX,QMIN,ntl,tlinicio,...
tlfinal,tlresis,tlreact,tlcond,tlsuscept,nsh,shnudo,shresis,shreact,..
.
    nld,nudocarga,PCARGA,QCARGA,itmax,tol,nmax] =
DatosFlujoPotencia()

%Esta función sirve para leer los datos de los nudos del sistema.
%Convención utilizada para los cuatro posibles tipos de nudos.
    %tipobus=1 oscilante
    %tipobus=2 PV generador
    %tipobus=3 PQ de carga
    %tipobus=4 PQ de generador

%%DATOS DE LOS NUDOS%%

nbb=9; %numero de nudos
tipobus(1)=1; VM(1)=1.04; VA(1)=0; %el nudo 1 es tipo 1
%(oscilante)
%el modulo de la tensión en el nudo 1 es ese valor y su argumento es
cero
%grados.
tipobus(2)=2; VM(2)=1.025; VA(2)=0;
%Nudo 2 es de tipo PV.
tipobus(3)=2; VM(3)=1.025; VA(3)=0;
%Nudo 3 es de tipo PV.
tipobus(4)=3; VM(4)=1; VA(4)=0;
%El resto serán de tipo PQ y sus condiciones iniciales de modulo y
%argumento son las indicadas.
tipobus(5)=3; VM(5)=1; VA(5)=0;
tipobus(6)=3; VM(6)=1; VA(6)=0;
tipobus(7)=3; VM(7)=1; VA(7)=0;
tipobus(8)=3; VM(8)=1; VA(8)=0;
tipobus(9)=3; VM(9)=1; VA(9)=0;
```

```
%%DATOS DE LOS GENERADORES%%
```

```
ngn=3; %numero de generadores  
%nudogen= nudo en el que está el generador.  
%PGEN y QGEN= las potencias generadas.  
%QMAX Y QMIN= limites de reactiva en los generadores.  
nudogen(1)=1; PGEN(1)=0; QGEN(1)=0; QMAX(1)=5; QMIN(1)=-5;  
nudogen(2)=2; PGEN(2)=1.63; QGEN(2)=0; QMAX(2)=3; QMIN(2)=-3;  
nudogen(3)=3; PGEN(3)=0.85; QGEN(3)=0; QMAX(3)=3; QMIN(3)=-3;
```

```
%%DATOS DE LAS LINEAS DE TRANSMISION%%
```

```
ntl=9; %numero de lineas de transmisión  
%tlinicio= nudo procedencia de la línea  
%tlfinal= nudo final de la línea
```

```
%LINEA 1 (TRANSFORMADOR)
```

```
tlinicio(1)=1; %el nudo de inicio de la línea de transmisión 1 es el  
nudo 1  
tlfinal(1)=4; %el nudo del final de la línea de transmisión 1 es el  
nudo 4  
tlresis(1)=0; tlreact(1)=0.0576; %resistencia y reactancia de dicha  
línea  
tlcond(1)=0; %conductancia derivador línea 1.  
tlsuscept(1)=0; %susceptancia del derivador de la línea 1.
```

```
%LINEA 2 (del nudo 4 al 6)
```

```
tlinicio(2)=4; tlfinal(2)=6; tlresis(2)=0.017; tlreact(2)=0.092;  
tlcond(2)=0; tlsuscept(2)=0.079;
```

```
%LINEA 3 (del nudo 4 al 5)
```

```
tlinicio(3)=4; tlfinal(3)=5; tlresis(3)=0.01; tlreact(3)=0.085;  
tlcond(3)=0; tlsuscept(3)=0.088;
```

```
%LINEA 4 (del nudo 6 al 9)
```

```
tlinicio(4)=6; tlfinal(4)=9; tlresis(4)=0.039; tlreact(4)=0.17;  
tlcond(4)=0; tlsuscept(4)=0.179;
```

```
%LINEA 5 (del nudo 5 al 7)
```

```
tlinicio(5)=5; tlfinal(5)=7; tlresis(5)=0.032; tlreact(5)=0.161;  
tlcond(5)=0; tlsuscept(5)=0.153;
```

```
%LINEA 6 (TRANSFORMADOR)
```

```
tlinicio(6)=2; tlfinal(6)=7; tlresis(6)=0; tlreact(6)=0.0625;  
tlcond(6)=0; tlsuscept(6)=0;
```

```
%LINEA 7 (del nudo 7 al 8)
tlinicio(7)=7;tlfinal(7)=8; tlresis(7)=0.0085; tlreact(7)=0.072;
tlcond(7)=0; tlsuscept(7)=0.0745;

%LINEA 8 (del nudo 9 al 8)
tlinicio(8)=9;tlfinal(8)=8; tlresis(8)=0.0119; tlreact(8)=0.1008;
tlcond(8)=0; tlsuscept(8)=0.1045;

%LINEA 9 (TRANSFORMADOR)
tlinicio(9)=3;tlfinal(9)=9; tlresis(9)=0; tlreact(9)=0.0586;
tlcond(9)=0; tlsuscept(9)=0;

%%DATOS DERIVADORES (SHUNT)%%
nsh=0; %numero de elementos derivadores
%shnudo = nudo en el que está el derivador
shnudo(1)=0;shresis(1)=0;shreact(1)=0;
%el nudo en el que esta es cero (no hay)
%resistencia elemento derivador 1 es cero
%reactancia del elemento derivador 1 es cero

%%DATOS DE LAS CARGAS DEL SISTEMA%%

nld=3; %numero de cargas en el sistema
%nudocarga= es el nudo en el que está situada la carga
nudocarga(1)=5; % la carga 1 está situada en el nudo 5
PCARGA(1)=1.25; QCARGA(1)=0.5; %potencias absorbidas por dicha carga.

nudocarga(2)=6;PCARGA(2)=0.9; QCARGA(2)=0.3;
nudocarga(3)=8;PCARGA(3)=1; QCARGA(3)=0.35;

%% PARAMETROS GENERALES%%

itmax=100; %el número de iteraciones máximo posible para evitar bucle
infinito.
tol=1e-12; %tolerancia de la iteración para alcanzar la solución
nmax=2*nbb;

end
```

```
function [it, VM, VA, PQenviada, PQrecibida, PQperdidas, PQnudo] =
ProgramaPrincipal()
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%           Rocío Camacho Aylagas
%           TFG
%           Departamento de Ingeniería Eléctrica 2015.

% (1) Lectura de datos del sistema: DatosFlujoPotencia
% (2) Función: Ybus
% (3) Función: NewtonRaphson
%     3.1 PotenciasNetas
%     3.2 PotenciasCalculadas
%     3.3 LimiteGeneradores
%     3.4 PotenciasDesajuste
%     3.5 Jacobiana
%     3.6 ActualizacionVariablesEstado
%
% (4) Función: FlujoPQ
clc;
clear all;

%función para leer los datos del sistema en el que se va a realizar el
flujo de potencia.

[nbb, tipobus, VM, VA, ngn, nudogen, PGEN, QGEN, QMAX, QMIN, ntl, tlinicio, tlfina
l, ...
tlresis, tlreact, tlcond, tlsuscept, nsh, shnudo, shresis, shreact, nld, nudoca
rga, ...
PCARGA, QCARGA, itmax, tol, nmax]=DatosFlujoPotencia();

%Función para el cálculo de la matriz de admitancias.
[YR, YI]=YBus(tlinicio, tlfinal, tlresis, tlreact, tlsuscept, tlcond, shnudo,
shresis, shreact, ntl, nbb, nsh);

%Función iterativa con el método Newton Raphson.Devuelve:
%%valores de los módulos y los ángulos de las tensiones
%%numero de iteraciones necesario para convergencia.
[VM, VA, it] =
NewtonRaphson(nmax, tol, itmax, ngn, nld, nbb, tipobus, nudogen, nudocarga, PGE
N, QGEN, QMAX, QMIN, PCARGA, QCARGA, YR, YI, VM, VA);

%Función para el cálculo de las potencias activas y reactivas por las
%lineas.
```



```
[PQenviada,PQrecibida,PQperdidas,PQnudo] =  
FlujoPQ(nbb,ngn,ntl,nld,nudogen,nudocarga,tlinicio,tlfinal,tlresis,tlreact,tlcond,tlsuscept,PCARGA,QCARGA,VM,VA);
```

```
%RESULTADOS DEL ANALISIS DEL FLUJO DE POTENCIA.
```

```
it %Nos muestra el numero de iteraciones necesarios para llegar a la  
convergencia
```

```
VM %Nos muestra el modulo de la tensión en cada nudo.
```

```
VA=VA*180/pi%Nos muestra el valor del ángulo de la tensión en grados.
```

```
PQperdidas %Perdidas de potencia en cada línea
```

```
PQenviada %Nos muestra la potencia enviada en cada nudo
```

```
PQrecibida %Nos muestra la potencia enviada en cada nudo
```

```
%BUCLE PARA HALLAR LAS PERDIDAS TOTALES DEL SISTEMA
```

```
Perdidastotales=0;
```

```
for xx=1:nbb
```

```
    Perdidastotales=Perdidastotales+PQperdidas(xx);
```

```
end
```

```
Perdidastotales
```

```
%Todos estos valores están en por unidad.
```

```
%%%%%%%%FIN DEL PROGRAMA PRINCIPAL %%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%FUNCION CONSTRUCCION MATRIZ ADMITANCIAS
```

```
function[YR,YI]= YBus(
```

```
tlinicio,tlfinal,tlresis,tlreact,tlcond,shnudo,shresis,shreact,ntl,nbb,nsh)
```

```
YR=zeros(nbb,nbb);
```

```
YI=zeros(nbb,nbb);
```

```
%Contribución de las lineas de transmisión.
```

```
for kk=1:ntl
```

```
    ii=tlinicio(kk);
```

```
    jj=tlfinal(kk);
```

```
    denom=tlresis(kk)^2+tlreact(kk)^2;
```

```
    YR(ii,ii)=YR(ii,ii)+tlresis(kk)/denom+tlcond(kk);
```

```
    YI(ii,ii)=YI(ii,ii)-tlreact(kk)/denom+tlsuscept(kk);
```

```
    YR(ii,jj)=YR(ii,jj)-tlresis(kk)/denom;
```

```
    YI(ii,jj)=YI(ii,jj)+tlreact(kk)/denom;
```

```
    YR(jj,ii)=YR(jj,ii)-tlresis(kk)/denom;
```

```
    YI(jj,ii)=YI(jj,ii)+tlreact(kk)/denom;
```

```
    YR(jj,jj)=YR(jj,jj)+tlresis(kk)/denom+tlcond(kk);
```

```
    YI(jj,jj)=YI(jj,jj)-tlreact(kk)/denom+tlsuscept(kk);
```

```

end

%Contribución de los elementos desviadores
for kk=1:nsh
    ii=shnudo(kk);
    denom=shresis(kk)^2+shreact(kk)^2;
    YR(ii,ii)=YR(ii,ii)+shresis(kk)/denom;
    YI(ii,ii)=YI(ii,ii)-shreact(kk)/denom;
end
end

%FIN DE LA FUNCION YBUS

%FUNCION NEWTON RAPHSON:
function [VM,VA,it] =
NewtonRaphson(nmax,tol,itmax,ngn,nld,nbb,tipobus,nudogen,nudocarga,PGE
N,QGEN,QMAX,QMIN,PCARGA,QCARGA,YR,YI,VM,VA)

%Esta función llama a diversas funciones para llevar a cabo la
solución por medio de iteración.
%Devolverá el modulo de la tensión, el argumento de la tensión y el
numero de iteraciones necesarias para que la solución converja.

%Se crea una matriz de 1 fila y el numero de nudos por dos de
columnas. Luego esta matriz será la resultante de dividir la Jacobiana
entre la matriz de potencias de desajuste activas y reactivas DPQ
traspuesta.

flag=0;
%indicador para salir del bucle si la solución converge.

it=1;
%contandor del bucle para no superar el numero de iteraciones máximas
y no provocar un bucle infinito.

%FUNCION PARA EL CALCULO DE LAS POTENCIAS NETAS EN LOS NUDOS.
[PNETA,QNETA] =
PotenciasNetas(nbb,ngn,nld,nudogen,nudocarga,PGEN,QGEN,PCARGA,QCARGA);
%se llama a la función para que devuelva las potencias netas activas y
%reactivas
%sus valores son constantes, no entran dentro de la iteración en un
%principio(a no ser que se superen los limites de reactiva de los
%generadores

while (it<itmax && flag==0)

    [PCAL,QCAL] = PotenciasCalculadas(nbb,VM,VA,YR,YI);
    %se llama a la función para que calcule y devuelva las potencias

```

```

    %calculadas reactiva y activa.
    [QNETA,tipobus] =
LimiteGeneradores(ngn,nudogen,tipobus,QGEN,QMAX,QMIN,QCAL,QNETA,QCARGA
,it,VM,nld,nudocarga);
    %Se comprueba que los limites de generadores no se sobrepasen.
    [DPQ,DP,DQ,flag] =
PotenciasDesajuste(nmax,nbb,tol,tipobus,flag,PNETA,QNETA,PCAL,QCAL);
    %Se hallan las potencias de desajuste y se comprueba que la
    solución converja, sino el bucle continua.
    [JAC] = Jacobiana(nmax,nbb,tipobus,PCAL,QCAL,VM,VA,YR,YI);
    %Calcula la matriz Jacobiana para poder actualizar las variables
de estado.
    D=JAC\DPQ';
    %calculo de la matriz D definida anteriormente
    [VA,VM] = ActualizacionVariablesEstado(nbb,D,VA,VM);
    % Esta última función actualiza las variables de estado y da un
    % nuevo valor.

    % este bucle se repetirá hasta que la solución converja o hasta
que el numero de iteraciones sea máximo.
    it=it +1;
    %sumamos 1 al contandor que en este caso son las iteraciones.
end
end
%FIN DE LA FUNCION NEWTON RAPHSON

%FUNCION PARA CALCULAR LAS POTENCIAS NETAS:
function [PNETA,QNETA] =
PotenciasNetas(nbb,ngn,nld,nudogen,nudocarga,PGEN,QGEN,PCARGA,QCARGA)

%calculo de las potencias netas
PNETA=zeros(1,nbb); %Se crea una matriz de 1 fila y nbb columnas de
ceros.
QNETA=zeros(1,nbb); %Igual para las potencias reactivas netas.

for ii=1:ngn

    PNETA(nudogen(ii))=PNETA(nudogen(ii))+PGEN(ii);
    %Se suma a cada termino de la matriz de ceros el valor de la
potencia activa generada en dicho nudo
    QNETA(nudogen(ii))=QNETA(nudogen(ii))+QGEN(ii);
    %Se suma a cada termino cero, la potencia reactiva generada en los
%nudos que tengan generación
end

for ii=1:nld
    PNETA(nudocarga(ii))=PNETA(nudocarga(ii))-PCARGA(ii);

```

```
QNETA(nudocarga(ii))=QNETA(nudocarga(ii))-QCARGA(ii);
%Se hace lo mismo que con los generadores pero para el caso de los
%nudos que tengan carga. Se construye la matriz restándoles las
%potencias activas y reactivas que consume la carga en cada nudo.
end
end
%FIN DE LA FUNCION POTENCIAS NETAS

%FUNCION CALCULO POTENCIAS CALCULADAS:
function [PCAL,QCAL] = PotenciasCalculadas(nbb,VM,VA,YR,YI)

PCAL=zeros(1,nbb);%primero se crea una matriz de una fila y nbb
columnas
QCAL=zeros(1,nbb);%lo mismo para las reactivas
%posteriormente las rellenaremos

%Se tiene dos contadores, para ir relacionando unos nudos con otros.
%EJEMPLO:
%Primero ii=1 y jj= 1, Se calcula PSUM y QSUM.
%Después ii=1y jj=2, se calcula PSUM y QSUM y se suma a lo anterior.
% Así sucesivamente con jj=3, jj=4, jj=5.... jj=9
%Entonces PCAL de nudo 1 y QCAL de nudo 1 será PSUM.

%Después de hará con ii=2,ii=3,....ii=9 y obtendremos PCAL y QCAL de
cada nudo.
%Así hasta obtener las dos matrices.

for ii=1:nbb
    PSUM=0;
    QSUM=0;

    for jj=1:nbb
        %formulas de la potencias activa y reactiva por una línea.
        PSUM=PSUM+VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*cos(VA(ii)-
        VA(jj))+YI(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj)));
        QSUM=QSUM+VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj))-
        YI(ii,jj)*cos(VA(ii)-VA(jj)));

    end
    PCAL(ii)=PSUM;
    QCAL(ii)=QSUM;
end
end
%FIN DE LA FUNCION POTENCIAS CALCULADAS
```

```
%FUNCION PARA REVISAR LIMITE GENERADORES
function [QNETA,tipobus] =
LimiteGeneradores (ngn,nudogen,tipobus,QGEN,QMAX,QMIN,QCAL,QNETA,QCARGA
,it,VM,nld,nudocarga)
%Esta función sirve para comprobar que los limites de reactiva de los
%generadores no son sobrepasados.

if it>2
    %si el numero de iteraciones es mayor de dos se hara la
comprobación
    flag2=0;
    for ii=1:ngn
        %se pone el contador desde 1 hasta ngn (num generadores)
        jj=nudogen(ii);
        %se asigna a jj el numero de nudo en el que está el generador
        if (tipobus(jj)==2)
            %si el tipo de nudo es 2, es decir PV generador
            if (QCAL(jj)>QMAX(ii))
                %y si la potencia reactiva calculada de ese nudo es
mayor que el límite máximo
                QNETA(nudogen(ii))=QMAX(ii);
                %la potencia reactiva neta en ese nudo será la máxima
%posible.
                tipobus(jj)=4;
                %el tipo de nudo cambiara a nudo PQ generador
                flag2=1;

            elseif (QCAL(jj)<QMIN(ii))
                %si la potencia reactiva calculada es menor que el
límite inferior posible.
                QNETA(nudogen(ii))=QMIN(ii);
                %se asigna el valor de la potencia mínima posible a la
%potencia reactiva neta en ese nudo
                tipobus(jj)=4;
                %el tipo de nudo pasa a ser de tipo PQ generador.
                flag2=1;

            end

        if flag2==1
            % si re ha realizado la asignación de la potencia
reactiva en el límite inferior o superior se hará lo
siguiente:
            for kk=1:nld
                %el contador va de 1 a el numero de cargas
                if nudocarga(kk)==jj
                    %si hay una carga en ese nudo PQ de
generación
```

```

                                %la potencia reactiva neta se le restara
                                %la potencia reactiva absorbida por la
                                %carga

QNETA(nudocarga(kk))=QNETA(nudocarga(kk))-
    QCARGA(kk);

end

end

end

end

end

end

end

%FIN DE LA FUNCION LIMITE GENERADORES

%FUNCION POTENCIAS DESAJUSTE:
function [DPQ,DP,DQ,flag] =
PotenciasDesajuste(nmax,nbb,tol,tipobus,flag,PNETA,QNETA,PCAL,QCAL)
%Sirve para calcular las potencias de desajuste

DPQ=zeros(1,nmax);
%Se crea una matriz de una fila y 2nbb columnas ( el numero de buses
por 2). La mitad de los términos serán de activa desajuste y la otra
mitad de ellos de reactiva de desajuste en cada nudo
DP=zeros(1,nbb);
%Se crea una matriz de una fila y nbb columnas (numero de nudos)
%Aquí se meterán las potencias de desajuste de cada nudo
DQ=zeros(1,nbb);
%Igual que la anterior pero de potencia reactiva de desajuste en cada
nudo del sistema.

DP=PNETA-PCAL; %La potencia activa de desajuste será la resta de la
potencia neta y la potencia calculada, halladas anteriormente.
DQ=QNETA-QCAL;%Igual para la potencia reactiva de desajuste

%A continuación se realiza un bucle para eliminar las contribuciones
de activa y reactiva en el nudo oscilante y, la reactiva de los nudos
PV.

for ii=1:nbb
    %contador desde el nudo 1 hasta nbb.
    if (tipobus(ii)==1)
        % si el tipo de nudo es oscilante
        DP(ii)=0;
        %lapotencia de desajuste activa en ese nudo será cero
        DQ(ii)=0;
    end
end

```

```

        %la potencia reactiva de desajuste en ese nudo será cero.

elseif (tipobus(ii)==2)
    %si se trata de un nudo PV generador, la potencia reactiva de
    %desajuste será cero
    DQ(ii)=0;

end
end

%Ahora para reordenar las potencias de desajuste,es decir, para
meterlas en la matriz DPQ, que es el conjunto de potencias activas y
reactivas de desajuste en una sola matriz

kk=1;
for ii=1:nbb
    % contador desde 1 hasta el numero de nudos del sistema.
    DPQ(kk)=DP(ii);
    DPQ(kk+1)=DQ(ii);
    kk=kk+2;%contador para ir rellenoando la matriz DPQ
    %Nos queda una matriz de una fila y 2nbb columnas en la que los
    términos impares serán las potencias activas de desajuste y los
    términos pares serán las potencias reactivas de desajuste.
end

%para comprobar si converge la solución:

for ii=1:nmax;
    % contador desde 1 hasta el numero de nudos por dos para recorrer
    la matriz DPQ hallada anteriormente.
    if (abs(DPQ)<tol)
        %si el valor absoluto de todos los valores de dicha matriz es
        menor que la tolerancia definida anteriormente
        flag=1;
        %se asigna este indicador para salir del bucle de iteración de
        %la función de Newton Raphson.
    end
end
end
end
%FIN FUNCION POTENCIAS DESAJUSTE

%FUNCION CONSTRUCCION MATRIZ JACOBIANA
function [JAC] = Jacobiana(nmax,nbb,tipobus,PCAL,QCAL,VM,VA,YR,YI)

%Esta función sirve para construir la matriz Jacobiana necesaria para
la iteración.
JAC=zeros(nmax,nmax);

```

```
%Se crea una matriz de nmax filas y nmax columnas

iii=1;
for ii=1:nbb
    jjj=1;
    for jj=1:nbb
        if ii==jj
            JAC(iii,jjj)=-QCAL(ii)-VM(ii)^2*YI(ii,ii);
            JAC(iii,jjj+1)=PCAL(ii)+VM(ii)^2*YR(ii,ii);
            JAC(iii+1,jjj)=PCAL(ii)-VM(ii)^2*YR(ii,ii);
            JAC(iii+1,jjj+1)=QCAL(ii)-VM(ii)^2*YI(ii,ii);

        else
            JAC(iii,jjj)=VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj))-
            YI(ii,jj)*cos(VA(ii)-VA(jj)));
            JAC(iii+1,jjj)=-VM(ii)*VM(jj)*(YI(ii,jj)*sin(VA(ii)-
            VA(jj))+YR(ii,jj)*cos(VA(ii)-VA(jj)));
            JAC(iii,jjj+1)=-JAC(iii+1,jjj);
            JAC(iii+1,jjj+1)=JAC(iii,jjj);

        end
        jjj=jjj+2;
    end
    iii=iii+2;
end

%Ahora se eliminara de los nudos oscilantes el modulo de la tensión y
el argumento.
%También del nudo PV generador se eliminara el modulo de la tensión.

for kk=1:nbb
    if (tipobus(kk)==1)
        ii=kk*2-1;
        for jj=1:nmax

            if ii==jj
                JAC(ii,ii)=1;
            else
                JAC(ii,jj)=0;
                JAC(jj,ii)=0;
            end
        end
    end
    if (tipobus(kk)==1) || (tipobus(kk)==2)
        ii=kk*2;

        for jj=1:nmax
```


- 120 -

```
%contador de la línea 1 a ntl
Vinicio=(VM(tlinicio(ii))*cos(VA(tlinicio(ii)))+VM(tlinicio(ii))*sin(V
A(tlinicio(ii)))*1i);
%Ya que tenemos los valores del modulo y argumento en cada nudo,
% Esta expresión sirve para ponerlo en forma de números complejos
en cada nudo.
%La expresión quedara de la forma A+jB. Se llamara inicio ya que
será considerada la tensión en el inicio de la línea.

Vfinal=(VM(tlfinal(ii))*cos(VA(tlfinal(ii)))+VM(tlfinal(ii))*sin(VA(tl
final(ii)))*1i);
%Lo mismo que en la expresión anterior, pero en este caso será
para el nudo de final de la línea que estemos tratando.

%Así ya se tiene la tensión en forma compleja de el inicio y final
de la linea.

tlimped=tlresis(ii)+tlreact(ii)*1i;
%Se calcula la impedancia de la línea en forma compleja.
%Sera la resistencia de la línea tratada mas la reactancia de la
línea tratada multiplicada por j (Parte imaginaria)

corriente=(Vinicio-
Vfinal)/tlimped+Vinicio*(tlcond(ii)+tlsuscept(ii)*1i);
%Se calcula la corriente en la línea tratada
%Se calculara por medio de la ley de ohm
%se sumara la contribución de resistencia mas reactancia mas la de
%conductancia y susceptancia del derivador.

PQenviada(ii)=Vinicio*conj(corriente);
%con la corriente calculada que fluye desde el inicio, se calcula
la potencia enviada desde el inicio. Esta será el producto de la
tensión en el inicio por el conjugado de la corriente.

corriente=(Vfinal-
Vinicio)/tlimped+Vfinal*(tlcond(ii)+tlsuscept(ii)*1i);
%Ahora se sustituye el valor anterior de la corriente por esta
%expresión, que calcula la corriente desde el final considerado de
la línea

PQrecibida(ii)=Vfinal*conj(corriente);
%Entonces la potencia recibida será la corriente desde el final
conjugada multiplicada por la tensión en el final

PQperdidas(ii)=PQenviada(ii)+PQrecibida(ii);
%Las perdidas en cada línea serán la suma de las pérdidas enviadas
%y las recibidas.
```

```
%SE SUMAN DEBIDO A QUE UNA DE LAS DOS TIENE SIGNO NEGATIVO,  
% Esto es porque se han calculado las potencias que salen de los  
nudos.  
end  
  
%Calculo de inyección de potencia activa y reactiva en cada nudo.  
PQnudo=zeros(1,nbb);  
%Matriz de una fila y nbb columnas  
  
for ii=1:ntl  
    %Bucle con contador desde 1 hasta el numero de lineas de  
    transmision del sistema.  
    PQnudo(tlinicio(ii))=PQnudo(tlinicio(ii))+PQenviada(ii);  
    %Ejemplo:  
    %Para el caso ii=1, tlinicio(1)=1(nudo1), PQnudo(1) es cero  
    (matriz de ceros creada al principio)+la potencia enviada en la línea  
    1.  
    PQnudo(tlfinal(ii))=PQnudo(tlfinal(ii))+PQrecibida(ii);  
  
end  
  
%correcciones en los nudos de generación, donde hay cargas, para  
conseguir contribuciones correctas de los generadores  
  
for ii=1:nld  
    %contador desde 1 hasta el numero de cargas del sistema  
    jj=nudocarga(ii);  
    %Se iguala a jj el nudo en el que esta la carga.  
    for kk=1:ngn  
        %contador desde 1 hasta el numero de generadores.  
        ll=nudogen(kk);  
        %Se iguala a ll el nudo en el que está el generador.  
        if jj==ll  
            %si coincide el nudo de generador con el nudo de la carga  
            PQnudo(jj)=PQnudo(jj)+(PCARGA(ii)+QCARGA(ii)*1i);  
            %la potencia del nudo en el que esta la carga y el  
            generador será la calculada anteriormente mas la suma de la  
            potencia activa y reactiva consumida en la carga.  
        end  
    end  
end  
end  
%FIN DE LA FUNCION DE FLUJO DE POTENCIAS  
end  
FIN DEL PROGRAMA PRINCIPAL.
```

ANEXO II.

ALGORITMO EN MATLAB DE FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR LTC

```
function
[nbb,tipobus,VM,VA,ngn,nudogen,PGEN,QGEN,QMAX,QMIN,ntl,tlinicio,...
tlfinal,tlresis,tlreact,tlcond,tlsuscept,nsh,shnudo,shresis,shreact,..
.
    nld,nudocarga,PCARGA,QCARGA,itmax,tol,nmax] =
DatosFlujoPotencia()

%Esta función sirve para leer los datos de los nudos del sistema.
%Convención utilizada para los cuatro posibles tipos de nudos.
    %tipobus=1 oscilante
    %tipobus=2 PV generador
    %tipobus=3 PQ de carga
    %tipobus=4 PQ de generador
    %tipobus=5 PVT controlado por el transformador regulador.

%%DATOS DE LOS NUDOS%%

nbb=10; %numero de nudos. Ahora se introducirá un nuevo nudo, el 10.
tipobus(1)=1; VM(1)=1.04; VA(1)=0; %el nudo 1 es tipo 1
%(oscilante)el modulo de la tensión en el nudo 1 es ese valor y su
argumento es cero grados.
tipobus(2)=2; VM(2)=1.025; VA(2)=0;
%Nudo 2 es de tipo PV.
tipobus(3)=2; VM(3)=1.025; VA(3)=0;
%Nudo 3 es de tipo PV.
tipobus(4)=3; VM(4)=1; VA(4)=0;
%El resto serán de tipo PQ y sus condiciones iniciales de modulo y
%argumento son las indicadas, menos el nudo 5 que en este caso es el
%controlado.
tipobus(5)=5; VM(5)=1; VA(5)=0; ;%Este nudo pasara a ser el nudo
controlado por el transformador regulador LTC
tipobus(6)=3; VM(6)=1; VA(6)=0
tipobus(7)=3; VM(7)=1; VA(7)=0;
tipobus(8)=3; VM(8)=1; VA(8)=0;
tipobus(9)=3; VM(9)=1; VA(9)=0;
```

```
tipobus(10)=3; VM(10)=1; VA(10)=0; %nuevo nudo introducido.

%%DATOS DE LOS GENERADORES%%

ngn=3; %numero de generadores
%nudogen= nudo en el que está el generador.
%PGEN y QGEN= las potencias generadas.
%QMAX Y QMIN= limites de reactiva en los generadores.
nudogen(1)=1; PGEN(1)=0; QGEN(1)=0; QMAX(1)=5; QMIN(1)=-5;
nudogen(2)=2; PGEN(2)=1.63; QGEN(2)=0; QMAX(2)=3; QMIN(2)=-3;
nudogen(3)=3; PGEN(3)=0.85; QGEN(3)=0; QMAX(3)=3; QMIN(3)=-3;

%%DATOS DE LAS LINEAS DE TRANSMISION%%

ntl=9; %numero de lineas de transmisión
%tlinicio=nudo procedencia de la línea
%tlfinal=nudo final de la línea

%LINEA 1 (TRANSFORMADOR)
tlinicio(1)=1; %el nudo de inicio de la línea de transmisión 1 es el
nudo 1
tlfinal(1)=4; %el nudo del final de la línea de transmisión 1 es el
nudo 4
tlresis(1)=0; tlreact(1)=0.0576; %resistencia y reactancia de dicha
línea
tlcond(1)=0; %conductancia derivador línea 1.
tlsuscept(1)=0; %susceptancia del derivador de la línea 1.

%LINEA 2 (del nudo 4 al 6)
tlinicio(2)=4; tlfinal(2)=6; tlresis(2)=0.017; tlreact(2)=0.092;
tlcond(2)=0; tlsuscept(2)=0.079;

%LINEA 3 (del nudo 4 al 5)
tlinicio(3)=4; tlfinal(3)=5; tlresis(3)=0.01; tlreact(3)=0.085;
tlcond(3)=0; tlsuscept(3)=0.088;

%LINEA 4 (del nudo 6 al 9)
tlinicio(4)=6; tlfinal(4)=9; tlresis(4)=0.039; tlreact(4)=0.17;
tlcond(4)=0; tlsuscept(4)=0.179;

%LINEA 5 (del nudo 10 al 7)
%Esta línea pasa a ir del nudo 5 al 7 a del 10 al 7.
%Ya que del nudo 5 al 10 se meterá la línea con el transformador
evaluado en este algoritmo.
tlinicio(5)=10; tlfinal(5)=7; tlresis(5)=0.032; tlreact(5)=0.161;
tlcond(5)=0; tlsuscept(5)=0.153;
```

```
%LINEA 6 (TRANSFORMADOR)
tlinicio(6)=2; tlfinal(6)=7; tlresis(6)=0; tlreact(6)=0.0625;
tlcond(6)=0; tlsuscept(6)=0;

%LINEA 7 (del nudo 7 al 8)
tlinicio(7)=7; tlfinal(7)=8; tlresis(7)=0.0085; tlreact(7)=0.072;
tlcond(7)=0; tlsuscept(7)=0.0745;

%LINEA 8 (del nudo 9 al 8)
tlinicio(8)=9; tlfinal(8)=8; tlresis(8)=0.0119; tlreact(8)=0.1008;
tlcond(8)=0; tlsuscept(8)=0.1045;

%LINEA 9 (TRANSFORMADOR)
tlinicio(9)=3; tlfinal(9)=9; tlresis(9)=0; tlreact(9)=0.0586;
tlcond(9)=0; tlsuscept(9)=0;

%%DATOS DERIVADORES (SHUNT)%%
nsh=0; %numero de elementos derivadores
%shnudo = nudo en el que está el derivador
shnudo(1)=0; shresis(1)=0; shreact(1)=0;
%el nudo en el que esta es cero (no hay)
%resistencia elemento derivador 1 es cero
%reactancia del elemento derivador 1 es cero

%%DATOS DE LAS CARGAS DEL SISTEMA%%

nld=3; %numero de cargas en el sistema
%nudocarga= es el nudo en el que está situada la carga
nudocarga(1)=5; % la carga 1 está situada en el nudo 5
PCARGA(1)=1.25; QCARGA(1)=0.5; %potencias absorbidas por dicha carga.
nudocarga(2)=6; PCARGA(2)=0.9; QCARGA(2)=0.3;
nudocarga(3)=8; PCARGA(3)=1; QCARGA(3)=0.35;

%% PARAMETROS GENERALES%%

itmax=100; %el número de iteraciones máximo posible para evitar bucle
infinito.
tol=1e-12; %tolerancia de la iteración para alcanzar la solución
nmax=2*nbb;

end

%Esta función nos proporcionara los datos del transformador LTC
```

```
function
[NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Rltc,Xltc,Tap,TapMax,TapMin,NudoControlado,LTCVM] = LTCDatosFlujoPotencia()
NLTC=1;
%Numero de transformadores LTC en el sistema estudiado.
LTCinicio(1)=5;
%La línea del transformador va desde el nudo 5 que es el nudo PVT
%controlado.
LTCfinal(1)=10;
%Hasta el nudo 10, nuevo nudo introducido PQ.
Rltc(1)=0; %Los devanados del transformador serán considerados sin
resistencia.
Xltc(1)=0.1; %La reactancia de los devanados del transformador será
0.1.
Tap(1)=1; %la condición inicial del trafo LTC está puesta en su valor
%nominal igual a 1.
TapMax(1)=1.5;
TapMin(1)=0.5;
%Estos son los limites superior e inferior de las tomas del
transformador.
NudoControlado(1)=5;
%El nudo controlado por el transformador será el nudo 5 (primario)
LTCVM(1)=1;%Es el modulo de la tensión que se quiere para el nudo
controlado.
end
```

```
function [it,VM,VA,PQenviada,PQrecibida,PQperdidas,PQnudo] =
ProgramaPrincipal()

%%%%%%%%%          PROGRAMA PRINCIPAL          %%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%
%          Rocío Camacho Aylagas
%          TFG
%          Departamento de Ingeniería Eléctrica 2015.

%          FLUJO DE CARGAS CON TRANSFORMADOR LTC.

% (1) Lectura de datos del sistema: DatosFlujoPotencia
% (2) Lectura datos del transformador LTC: LTCDatosFlujoPotencia
% (3) Función: Ybus
% (4) Función: LTCNewtonRaphson
%     4.1 PotenciasNetas
%     4.2 PotenciasCalculadas
%     4.3 LTCPotenciasCalculadas
%     4.4 LimiteGeneradores
%     3.5 PotenciasDesajuste
%     3.6 Jacobiana
%     3.7 LTCJacobiana
%     3.8 ActualizacionVariablesEstado
%     3.9 LTCActualizaciones
%     3.10 LTCLimites
%
% (5) Función: FlujoPQ
% (6) Función: LTCFlujoPQ

%Con esto se lee la función con los datos del sistema
[nbb,tipobus,VM,VA,ngn,nudogen,PGEN,QGEN,QMAX,QMIN,ntl,tlinicio,tlfinal,...
tlresis,tlreact,tlcond,tlsuscept,nsh,shnudo,shresis,shreact,nld,nudocarga,...
PCARGA,QCARGA,itmax,tol,nmax]=DatosFlujoPotencia();

%Con esta función se leen los datos del transformador LTC.
[NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Rltc,Xltc,Tap,TapMax,TapMin,NudoControlado,LTCVM] = LTCDatosFlujoPotencia();

[YR,YI]=YBus(tlinicio,tlfinal,tlresis,tlreact,tlsuscept,tlcond,shnudo,shresis,shreact,ntl,nbb,nsh);
%con esta función se calculan las matrices de admitancias
```



```
[VM,VA,it, Tap] =
LTCNewtonRaphson(tol,itmax,ngn,nld,nbb,tipobus,nudogen,nudocarga,PGEN,
QGEN,QMAX,QMIN,PCARGA,QCARGA,YR,YI,VM,VA,NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Rltc,
Xltc, Tap, TapMax, TapMin, NudoControlado, LTCVM);
%Devuelve los valores de los módulos y los desfases de las tensiones
%el número de iteraciones necesario para llegar a la convergencia.
%y el valor de la toma del transformador para conseguir el modulo
requerido en el nudo controlado.

[PQenviada,PQrecibida,PQperdidas,PQnudo] =
FlujoPQ(nbb,ngn,ntl,nld,nudogen,nudocarga,tlinicio,tlfinal,tlresis,tlr
eact,tlcond,tl suscept,PCARGA,QCARGA,VM,VA);
%Devuelve los flujos de potencia en los nudos sin tener en cuenta la
línea del transformador LTC.

[LTCPQenviada,LTCPQrecibida]
=LTCFlujoPQ(NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Rltc,Xltc, Tap,VM,VA);
%Devuelve la potencia activa y reactiva por la línea del
transformador.

it %Numero de iteraciones necesarios para llegar a la convergencia
VM %Modulo de la tensión en cada nudo.
VA=VA*180/pi% Ángulo de la tensión en grados.
PQenviada %Potencia enviada en cada nudo
PQrecibida %Potencia recibida en cada nudo
Tap %Posición final de la toma del transformador regulador.
LTCPQenviada %Potencia activa enviada desde el nudo de inicio de la
línea del transformador LTC
LTCPQrecibida %Potencia reactiva enviada desde el nudo de inicio de la
línea del transformador LTC
PQperdidas %Perdidas en por unidad de cada línea.

%Bucle para el calculo de pérdidas totales.
Perdidastotales=0;
for xx=1:ntl
    Perdidastotales=Perdidastotales+PQperdidas(xx);
end

Perdidastotales %Perdidas totales del sistema en por unidad.
%Todos estos valores están en por unidad.

%FINAL DE LA FUNCION PROGRAMA PRINCIPAL
```

```
%FUNCION CALCULO YBUS
function [YR,YI] = YBus(
tlinicio,tlfinal,tlresis,tlreact,tlsuscept,tlcond,shnudo,shresis,shrea
ct,ntl,nbb,nsh)

YR=zeros(nbb,nbb);
YI=zeros(nbb,nbb);

%contribución de las lineas de transmisión.
for kk=1:ntl
    ii=tlinicio(kk);
    jj=tlfinal(kk);
    denom=tlresis(kk)^2+tlreact(kk)^2;
    YR(ii,ii)=YR(ii,ii)+tlresis(kk)/denom+0.5*tlcond(kk);
    YI(ii,ii)=YI(ii,ii)-tlreact(kk)/denom+0.5*tlsuscept(kk);
    YR(ii,jj)=YR(ii,jj)-tlresis(kk)/denom;
    YI(ii,jj)=YI(ii,jj)+tlreact(kk)/denom;
    YR(jj,ii)=YR(jj,ii)-tlresis(kk)/denom;
    YI(jj,ii)=YI(jj,ii)+tlreact(kk)/denom;
    YR(jj,jj)=YR(jj,jj)+tlresis(kk)/denom+0.5*tlcond(kk);
    YI(jj,jj)=YI(jj,jj)-tlreact(kk)/denom+0.5*tlsuscept(kk);
end

%contribución de los elementos desviadores
for kk=1:nsh
    ii=shnudo(kk);
    denom=shresis(kk)^2+shreact(kk)^2;
    YR(ii,ii)=YR(ii,ii)+shresis(kk)/denom;
    YI(ii,ii)=YI(ii,ii)-shreact(kk)/denom;
end
end

%FIN DE LA FUNCION YBUS

%FUNCION DE NEWTON RAPHSON PARA EL TRANSFORMADOR LTC
function [VM,VA,it,Tap] =
LTCNewtonRaphson(tol,itmax,ngn,nld,nbb,tipobus,nudogen,nudocarga,PGEN,
QGEN,QMAX,QMIN,PCARGA,QCARGA,YR,YI,VM,VA,NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Rltc,
Xltc,Tap,TapMax,TapMin,NudoControlado,LTCVM)

%Esta función llama a diversas funciones para llevar a cabo la
solución.
%Devolverá el modulo y el argumento de la tensión, el número de
iteraciones necesarias para que la solución converja y por
% ultimo el valor de la toma necesario para mantener el modulo de la
% tensión en el nudo controlado en el valor requerido.
```

```
flag=0;
%indicador para salir del bucle si la solución converge.

it =1;
%contador del bucle para no superar el numero de iteraciones máximas
y no provocar un bucle infinito.

[PNETA,QNETA] =
PotenciasNetas(nbb,ngn,nld,nudogen,nudocarga,PGEN,QGEN,PCARGA,QCARGA);
%se llama a la función para que calcule las potencias netas activas y
%reactivas

while (it<itmax && flag==0)
    [PCAL,QCAL] = PotenciasCalculadas(nbb,VM,VA,YR,YI);
    %se llama la función para que devuelva y calcule las potencias
    %calculadas reactiva y activa.

    [PCAL,QCAL,ltcPCAL,ltcQCAL] =
LTCPotenciasCalculadas(NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Tap,Rltc,Xltc,VM,VA,PCA
L,QCAL);
    %Esta función devolverá tanto las potencias calculadas por las
    %lineas ya actualizadas con la contribución del trafo, tanto las
    %calculadas por la línea del transformador LTC.

    [QNETA,tipobus] =
LimiteGeneradores(ngn,nudogen,tipobus,QGEN,QMAX,QMIN,QCAL,QNETA,QCARGA
,it,VM,nld,nudocarga);
    %Función para comprobar si se han superado los límites de reactiva
    %de los generadores del sistema.

    [DPQ,DP,DQ,flag] =
PotenciasDesajuste(nmax,nbb,tol,tipobus,flag,PNETA,PCAL,QNETA,QCAL);
    %Se hallan las potencias de desajuste y se comprueba que la
    %solución converja, sino el bucle continua.

    if flag==1
        break
    end

    [JAC] = Jacobiana(nbb,tipobus,PCAL,QCAL,VM,VA,YR,YI,nmax);
    %Calcula la matriz Jacobiana para poder actualizar las variables
    %de estado.

    [JAC] =
LTCJacobiana(tipobus,LTCinicio,LTCfinal,NLTC,Tap,NudoControlado,Rltc,X
ltc,ltcPCAL,ltcQCAL,VM,VA,JAC);
```

```
%Con esta función se modifica la matriz Jacobiana con la
contribución de la línea con el transformador LTC

D=JAC\DPQ';
%calculo de la matriz D definida anteriormente

[VA,VM] = ActualizacionVariablesEstado(nbb,D,VA,VM);
% Esta última función actualiza las variables de estado y nos da
un nuevo valor.

[VM, Tap] =
LTCActualizaciones(VM,D,tipobus,NLTC,LTCinicio,LTCfinal, Tap,NudoContro
lado,LTCVM);
%Se llama a esta función para calcular el nuevo valor de la toma
del transformador necesaria para asignar la tensión requerida en el
nudo controlado.

[Tap,tipobus] =
LTCLimites(tipobus,NLTC, Tap, TapMax, TapMin,LTCinicio,LTCfinal);
%Para revisar si los limites de las tomas han sido violados.

%Este bucle se repetirá hasta que la solución converja o hasta que el
numero de iteraciones sea máximo.

it=it +1;
%sumamos 1 al contandor que en este caso son las iteraciones
end
end
%FIN DE LA FUNCION NEWTON RAPHSON

%FUNCION PARA LAS POTENCIAS NETAS
function [PNETA,QNETA] =
PotenciasNetas(nbb,ngn,nld,nudogen,nudocarga,PGEN,QGEN,PCARGA,QCARGA)

%calculo de las potencias netas
PNETA=zeros(1,nbb); %Se crea una matriz de 1 fila y nbb columnas de
ceros
QNETA=zeros(1,nbb); %Igual para las potencias reactivas netas.

%Lo siguiente es rellenar la matriz con valores
for ii=1:ngn

PNETA(nudogen(ii))=PNETA(nudogen(ii))+PGEN(ii);
%se suma a cada termino de la matriz de ceros el valor de la
potencia activa generada en dicho nudo
QNETA(nudogen(ii))=QNETA(nudogen(ii))+QGEN(ii);
```

```

    %Suma a cada termino cero, la potencia reactiva generada en los
    %nodos que tengan generación
end
for ii=1:nld
    PNETA(nudocarga(ii))=PNETA(nudocarga(ii))-PCARGA(ii);
    QNETA(nudocarga(ii))=QNETA(nudocarga(ii))-QCARGA(ii);
    %Se hace lo mismo que con los generadores pero para el caso de los
    %nodos que tengan carga.
end
end
%FIN FUNCION POTENCIAS NETAS

%FUNCION POTENCIAS CALCULADAS
function [PCAL,QCAL] = PotenciasCalculadas(nbb,VM,VA,YR,YI)
PCAL=zeros(1,nbb);%pcrea una matriz de una fila y nbb columnas
QCAL=zeros(1,nbb);%lo mismo para las reactivas

for ii=1:nbb
    PSUM=0;
    QSUM=0;

    for jj=1:nbb
        PSUM=PSUM+VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*cos(VA(ii)-
VA(jj))+YI(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj)));
        QSUM=QSUM+VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj))-
YI(ii,jj)*cos(VA(ii)-VA(jj)));
    end
    PCAL(ii)=PSUM;
    QCAL(ii)=QSUM;
end
end
%FIN DE LA FUNCION POTENCIAS CALCULADAS

%FUNCION POTENCIAS CALCULADAS LTC
function [PCAL,QCAL,ltcPCAL,ltcQCAL] =
LTCPotenciasCalculadas(NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Tap,Rltc,Xltc,VM,VA,PCA
L,QCAL)
%En esta función se recalculan las potencias calculadas por las
%lineas con la contribucion del transformador LTC.

for ii=1:NLTC;
    %Contador desde 1 hasta el numero de transformadores LTC.
    kk=(ii-1)*2+1;
    % Servirá para ir rellenando la matriz de potencias calculadas
    % activas y reactivas.

    %Calculo de las admitancias del transformador LTC.

```

```

denom=Rltc(ii)^2+Xltc(ii)^2;
YRS=Rltc(ii)/denom;
%Conductancia Gkk o Gmm
YIS=-Xltc(ii)/denom;
%Esla susceptancia Bkk o Bmm
YRM=-Rltc(ii)/denom;
%Esla conductancia Gkm.
YIM=Xltc(ii)/denom;
%Esla susceptancia Bkm.

A1=VA(LTCinicio(ii))-VA(LTCfinal(ii));
%Desfase entre el argumento de la tensión del nudo inicio y nudo
    final.
A2=VA(LTCfinal(ii))-VA(LTCinicio(ii));
%Desfase entre el argumento de la tensión del nudo final y nudo
    inicio.

%Calculo de las potencias por el LTC

ltcPCAL(kk)=(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS+(Tap(ii)*VM(LTCinicio(ii))*VM(LT
Cfinal(ii))*(YRM*cos(A1)+YIM*sin(A1)));
ltcQCAL(kk)=-
((VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS+((Tap(ii)*VM(LTCinicio(ii))*VM(LTCfinal(ii)
))*YRM*sin(A1)-YIM*cos(A1)));

ltcPCAL(kk+1)=((VM(LTCfinal(ii))*Tap(ii))^2)*YRS+(Tap(ii)*VM(LTCinicio
(ii))*VM(LTCfinal(ii))*(YRM*cos(A2)+YIM*sin(A2)));
ltcQCAL(kk+1)=-
((VM(LTCfinal(ii))*Tap(ii))^2)*YIS+(Tap(ii)*VM(LTCinicio(ii))*VM(LTCfi
nal(ii))*(YRM*sin(A2)-YIM*cos(A2)));

%Actualización potencias calculadas:
%Ahora se suman las potencias calculadas en este apartado del
    transformador a las que se tienen en la función
    PotenciasCalculadas de las líneas.

PCAL(LTCinicio(ii))=PCAL(LTCinicio(ii))+ltcPCAL(kk);
QCAL(LTCinicio(ii))=QCAL(LTCinicio(ii))+ltcQCAL(kk);

PCAL(LTCfinal(ii))=PCAL(LTCfinal(ii))+ltcPCAL(kk+1);
QCAL(LTCfinal(ii))=QCAL(LTCfinal(ii))+ltcQCAL(kk+1);
end
end
%FIN DE LA FUNCION LTC POTENCIAS CALCULADAS

%FUNCION LIMITE GENERADORES

```

```
function [QNETA,tipobus] =  
LimiteGeneradores (ngn,nudogen,tipobus,QGEN,QMAX,QMIN,QCAL,QNETA,QCARGA  
,it,VM,nld,nudocarga)  
%Esta función sirve para comprobar que los limites de reactiva de los  
%generadores no son sobrepasados.  
  
if it>2  
    %si el numero de iteraciones es mayor de dos se hará la  
    comprobación  
    flag2=0;  
    for ii=1:ngn  
        %se pone el contador desde 1 hasta ngn (numero generadores)  
        jj=nudogen(ii);  
        %se asigna a jj el numero de nudo en el que está el generador  
        if (tipobus(jj)==2)  
            %si el tipo de nudo es 2, es decir PV generador  
            if (QCAL(jj)>QMAX(ii))  
                %y si la potencia reactiva calculada de ese nudo es  
                mayor que el límite máximo  
                QNETA(nudogen(ii))=QMAX(ii);  
                %la potencia reactiva neta en ese nudo será la máxima  
                %posible.  
                tipobus(jj)=4;  
                %el tipo de nudo cambiara a nudo PQ generador  
                flag2=1;  
  
            elseif (QCAL(jj)<QMIN(ii))  
                %si la potencia reactiva calculada es menor que el  
                limite  
                %inferior posible.  
                QNETA(nudogen(ii))=QMIN(ii);  
                %se asigna el valor de la potencia mínima posible a la  
                %potencia reactiva neta en ese nudo  
                tipobus(jj)=4;  
                %el tipo de nudo pasa a ser de tipo PQ generador.  
                flag2=1;  
            end  
  
            if flag2==1  
                % si re ha realizado la asignación de la potencia  
                reactiva en el límite inferior o superior se hará lo  
                siguiente:  
                for kk=1:nld  
                    %el contador va de 1 a el numero de cargas  
                    if nudocarga(kk)==jj  
                        %si hay una carga en ese nudo PQ de  
                        generación la potencia reactiva neta se
```



```

        end
    end
    %Ahora para reordenar las potencias de desajuste.
    % es decir, para meterlas en la matriz DPQ que es el conjunto de
    potencias activas y reactivas de desajuste en una sola matriz
    kk=1;
    for ii=1:nbb
        % contador desde 1 hasta el numero de nudos del sistema.
        DPQ(kk)=DP(ii);
        DPQ(kk+1)=DQ(ii);
        kk=kk+2;%contador para ir rellenando la matriz DPQ
    end

    %comprobar si converge la solución:
    for ii=1:nmax
        % contador desde 1 hasta el numero de nudos por dos para recorrer
        la matriz DPQ hallada anteriormente.
        if (abs(DPQ)<tol)
            %si el valor absoluto de todos los valores de dicha matriz es
            menor que la tolerancia definida anteriormente
            flag=1;
            %asignamos este indicador para salirnos del bucle de iteración
            de la función de Newton Raphson.
        end
    end
end
end
%FIN FUNCION POTENCIAS DESAJUSTE

%FUNCION JACOBIANA
function [JAC] = Jacobiana(nbb,tipobus,PCAL,QCAL,VM,VA,YR,YI,nmax)

%Esta función sirve para construir la matriz Jacobiana necesaria para
la iteración.
JAC=zeros(nmax,nmax);
%Se crea una matriz de nmax filas y nmax columnas

iii=1;
for ii=1:nbb
    jjj=1;
    for jj=1:nbb
        if ii==jj
            JAC(iii,jjj)=-QCAL(ii)-VM(ii)^2*YI(ii,ii);
            JAC(iii,jjj+1)=PCAL(ii)+VM(ii)^2*YR(ii,ii);
            JAC(iii+1,jjj)=PCAL(ii)-VM(ii)^2*YR(ii,ii);
            JAC(iii+1,jjj+1)=QCAL(ii)-VM(ii)^2*YI(ii,ii);
        end
        else
    end
end
end

```

```

        JAC(III,jjj)=VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj))-
        YI(ii,jj)*cos(VA(ii)-VA(jj)));
        JAC(III+1,jjj)=-VM(ii)*VM(jj)*(YI(ii,jj)*sin(VA(ii)-
        VA(jj))+YR(ii,jj)*cos(VA(ii)-VA(jj)));
        JAC(III,jjj+1)=-JAC(III+1,jjj);
        JAC(III+1,jjj+1)=JAC(III,jjj);
    end
    jjj=jjj+2;
end
III=III+2;
end

%Ahora se eliminara de los nudos oscilantes el modulo de la tensión y
el argumento.
%También del nudo PV generador se eliminara el modulo de la tensión.

for kk=1:nbb
    if (tipobus(kk)==1)
        ii=kk*2-1;
        for jj=1:nmax
            if ii==jj
                JAC(ii,ii)=1;
            else
                JAC(ii,jj)=0;
                JAC(jj,ii)=0;
            end
        end
    end
    if (tipobus(kk)==1 || (tipobus(kk)==2)
        ii=kk*2;
        for jj=1:nmax
            if ii==jj
                JAC(ii,ii)=1;
            else
                JAC(ii,jj)=0;
                JAC(jj,ii)=0;
            end
        end
    end
end
end
end
%FIN JACOBIANA

%FUNCION JACOBIANA LTC
function [JAC] =
LTCJacobiana(tipobus,LTCinicio,LTCfinal,NLTC,Tap,NudoControlado,Rltc,X
ltc,ltcPCAL,ltcQCAL,VM,VA,JAC)

```

%Modificara la matriz Jacobiana anterior calculada con la contribución del transformador de tomas variables LTC.

%MODIFICACION MATRIZ JACOBIANA.

for ii=1:NLTC

ind=NudoControlado(ii)-LTCinicio(ii);

%Hacemos cero la columna correspondiente a las derivadas de las potencias con respecto de la tensión en el nudo controlado, ya que ese término va a cambiar.

JAC1=JAC;

JAC(:,2*NudoControlado(ii))=0.0;

if ind==0

for nn=1:2

%Calculo de admitancias LTC.

denom=Rltc(ii)^2+Xltc(ii)^2;

YRS=Rltc(ii)/denom;

YIS=-Xltc(ii)/denom;

ss=(ii-1)*2+nn;

%Calculo de las entradas Jacobianas LTC.

JKK(1,1)=-(VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS;

JKK(1,2)=-(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS;

JKK(2,1)=-(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS;

JKK(2,2)=+(VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS;

JKM(1,1)=ltcQCAL(ss)+(VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS;

JKM(1,2)=ltcPCAL(ss)-(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS;

JKM(2,1)=-(ltcPCAL(ss)+(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS;

JKM(2,2)=ltcQCAL(ss)+(VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS;

if nn==2

JKK(1,2)=+(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS;

JKK(2,2)=-(VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS;

JKM(1,2)=ltcPCAL(ss)+(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS;

JKM(2,2)=ltcQCAL(ss)-(VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS;

end

%Si se han superado los límites de las tomas:

if

((tipobus(LTCinicio(ii))==4)&&(NudoControlado(ii)==LTCinicio(ii)))

```

    %Si el nudo PVT se ha convertido en PQ generador, es decir,
    que se
    %ha llegado al límite de las tomas y ya no se puede hacer un
    %control de la tensión.

    %%JAC(:,2*NudoControlado(ii))=0.0;

    if nn==1

        JKK(:,2)=0.0;
        JKK(1,2)=JAC1(2*NudoControlado(ii)-
            1,2*NudoControlado(ii))+(VM(LTCinicio(ii))^2)*YRS;

        JKK(2,2)=JAC1(2*NudoControlado(ii),2*NudoControlado(ii))-
            (VM(LTCinicio(ii))^2)*YIS;

        JMK=zeros(2,2);
        JMK(1,2)=ltpPCAL(ss+1)-
            (VM(LTCfinal(ii))^2)*(Tap(ii)^2)*YRS;

        JMK(2,2)=ltpQCAL(ss+1)+((VM(LTCfinal(ii))^2)*(Tap(ii)^2)*YIS);
    end
end

%Eliminación si existe un nudo oscilante o PV generador.
if ((tipobus(LTCinicio(ii))==2)&&(tipobus(LTCfinal(ii))>2))
    JKK(1,2)=0;
    JKK(2,1)=0;
    JKK(2,2)=0;
    if nn==1
        JKM(2,1)=0;
        JKM(2,2)=0;
    else
        JKM(1,2)=0;
        JKM(2,2)=0;
    end
elseif ((tipobus(LTCinicio(ii))==1)&&(tipobus(LTCfinal(ii))>2))
    JKK=zeros;
    JKM=zeros;
end

%Adición a la Jacobiana de los términos hallados.
kk=2*LTCinicio(ii)-1;
mm=2*LTCfinal(ii)-1;

JAC(kk:kk+1, kk:kk+1)=JAC(kk:kk+1, kk:kk+1)+JKK;

```

```

    if (tipobus(LTCinicio(ii))==4)

        JAC(mm:mm+1, kk:kk+1)=JAC(mm:mm+1, kk:kk+1)+JMK;
        JAC(kk:kk+1, mm:mm+1)=JAC(kk:kk+1, mm:mm+1)+JKM;
    else

        JAC(kk:kk+1, mm:mm+1)=JAC(kk:kk+1, mm:mm+1)+JKM;

    end
    inicio=LTCinicio(ii);
    LTCinicio(ii)=LTCfinal(ii);
    LTCfinal(ii)=inicio;

    VM(LTCinicio(ii))=VM(LTCinicio(ii))*Tap(ii);
end
end
end
end
%FIN LTC JACOBIANA

%FUNCION ACTUALIZACION VARIABLES ESTADO
function [VA,VM] = ActualizacionVariablesEstado(nbb,D,VA,VM)

%En esta última función actualizamos las variables de estado.
%Estas son los módulos y argumentos de las tensiones.

iii=1;
for ii=1:nbb

    VA(ii)=VA(ii)+D(iii);
    VM(ii)=VM(ii)+D(iii+1)*VM(ii);
    iii=iii+2;
end
end
%FIN ACTUALIZACION VARIABLES ESTADO

%ACTUALIZACION VARIABLES LTC
function [VM, Tap] =
LTCActualizaciones(VM,D,tipobus,NLTC,LTCinicio,LTCfinal, Tap,NudoContro
lado,LTCVM)

%Función para actualizar las tomas del transformador regulador.
%Y para actualizar los módulos de las tensiones en los nudos
controlados

for ii=1:NLTC

```

```

    %Contador desde uno hasta el numero de transformadores LTC en el
    %sistema estudiado.
    if
    ((tipobus(LTCinicio(ii))==5)&&(NudoControlado(ii)==LTCinicio(ii)))
        %condición interna del bucle:
        %Si el tipo de nudo del nudo de inicio de la línea con el
        %transformador es de tipo 5, es decir, PVT, y además el
        %nudo controlado por el trafo es el mismo que el nudo
        anterior.
        Tap(ii)=Tap(ii)+D(2*LTCinicio(ii))*Tap(ii);
        %La toma del transformador se actualizara, sumando el valor
        %anterior mas el termino de la matriz D multiplicado por la
        toma anterior.
        VM(LTCinicio(ii))=LTCVM(ii);
        %El modulo del nudo de inicio de la línea del transformador
        será igual a él modulo objetivo que hemos asignado.

    elseif
    ((tipobus(LTCfinal(ii))==5)&&(NudoControlado(ii)==LTCfinal(ii)))
        %Además, si el nudo del final de la línea del transformador es
        de tipo PVT y el nudo controlado es el mismo
        Tap(ii)=Tap(ii)+D(2*LTCfinal(ii))*Tap(ii);
        %Se hará los mismo que en el caso anterior.
        % se añadirá el termino de la matriz D multiplicado por la
        toma anterior.
        VM(LTCfinal(ii))=LTCVM(ii);
        %Y el valor del modulo de dicho nudo era el valor asignado.
    end
end
end
%FIN LTC ACTUALIZACIONES

%FUNCION LIMITE DE TOMAS
function [Tap,tipobus] =
LTCLimites(tipobus,NLTC,Tap,TapMax,TapMin,LTCinicio,LTCfinal)

%Comprobación de los limites de las tomas del transformador
%En el caso de que se superen, se harán determinadas correcciones.
for ii=1:NLTC
    %Contador desde 1 hasta el numero de transformadores LTC
    for kk=1:2
        if (tipobus(LTCinicio(ii))==5)
            %Si el tipo de nudo del inicio de la línea del
            transformador es PVT
            if (Tap(ii)>TapMax(ii))
                %y si la toma es mayor que el valor máximo asignado
                Tap(ii)=TapMax(ii);
                %Se obligara a que la toma tome ese valor
            end
        end
    end
end

```

```

        tipobus(LTCinicio(ii))=4;
        %y el tipo de nudo pasara a ser de tipo PQ generador.
    elseif (Tap(ii)<TapMin(ii))
        %Por otro lado, si la toma es inferior al limite
        mínimo
        Tap(ii)=TapMin(ii);
        %Se asigna el valor mínimo a la toma
        tipobus(LTCinicio(ii))=4;
        %el nudo pasa a ser nudo PQ de generador
    end
end
inicio=LTCinicio(ii);
LTCinicio(ii)=LTCfinal(ii);
LTCfinal(ii)=inicio;
end
end
end
%FIN LTC LIMITES

%FUNCION FLUJO DE POTENCIAS
function [PQenviada,PQrecibida,PQperdidas,PQnudo] =
FlujoPQ(nbb,ngn,ntl,nld,nudogen,nudocarga,tlinicio,tlfinal,tlresis,tlr
eact,tlcond,tlsuscept,PCARGA,QCARGA,VM,VA)

%El objetivo de esta función es conocer la potencia enviada y recibida
en cada nudo, además de las perdidas en cada línea de transmisión.

PQenviada=zeros(1,ntl);
%Se crea una matriz de una fila y ntl columnas
PQrecibida=zeros(1,ntl);
%Otra matriz de una fila y ntl columnas

%Bucle para calcular la potencia activa y reactiva en el inicio y
final de cada línea de transmisión.

for ii=1:ntl
    %contador de la línea 1 a ntl
    Vinicio=(VM(tlinicio(ii))*cos(VA(tlinicio(ii)))+VM(tlinicio(ii))*sin(V
A(tlinicio(ii)))*1i);
    % Ya que tenemos los valores del modulo y argumento en cada nudo,
    % Esta expresión sirve para ponerlo en forma de números complejos
    % Se llamara inicio ya que será considerada la tensión en el
    inicio de la línea.

    Vfinal=(VM(tlfinal(ii))*cos(VA(tlfinal(ii)))+VM(tlfinal(ii))*sin(VA(tl
final(ii)))*1i);

```

```

%Lo mismo que en la expresión anterior, pero en este caso será
    para el nudo de final de la línea que estemos tratando.

    tlimped=tlresis(ii)+tlreact(ii)*1i;
    %Calculamos la impedancia de la línea en forma compleja.

    corriente=(Vinicio-
Vfinal)/tlimped+Vinicio*(tlcond(ii)+tlsuscept(ii)*1i);
    %Se calcula la corriente en la línea tratada

    PQenviada(ii)=Vinicio*conj(corriente);
    %con la corriente calculada que fluye desde el inicio se calcula
        la potencia enviada desde el inicio.
    .    Esta será el producto de la tensión en el inicio
    %por el conjugado de la corriente.

    corriente=(Vfinal-
Vinicio)/tlimped+Vfinal*(tlcond(ii)+tlsuscept(ii)*1i);
    %Ahora se sustituye el valor anterior de la corriente por esta
    %expresión, que calcula la corriente desde el final
    PQrecibida(ii)=Vfinal*conj(corriente);
    %Entonces la potencia recibida será la corriente desde el final
        conjugada multiplicada por la tensión en el final

    PQperdidas(ii)=PQenviada(ii)+PQrecibida(ii);
    %Las perdidas en cada línea serán la suma de las pérdidas enviadas
    %y las recibidas.
end

%Calculo de inyección de potencia activa y reactiva en cada nudo.

PQnudo=zeros(1,nbb);
%Matriz de una fila y nbb columnas

for ii=1:ntl

    PQnudo(tlinicio(ii))=PQnudo(tlinicio(ii))+PQenviada(ii);
    PQnudo(tlfinal(ii))=PQnudo(tlfinal(ii))+PQrecibida(ii);

end

%correcciones en los nudos de generación, donde hay cargas, para
conseguir contribuciones correctas de los generadores

for ii=1:nld
    %contador desde 1 hasta el numero de cargas del sistema

```



```

    jj=nudocarga(ii);
    %Igualamos a jj el nudo en el que esta la carga.
    for kk=1:ngn
        %contador desde 1 hasta el numero de generadores.
        ll=nudogen(kk);
        %Igualamos a ll el nudo en el que está el generador.
        if jj==ll
            %si coincide el nudo de generador con el nudo de la carga
            PQnudo(jj)=PQnudo(jj)+(PCARGA(ii)+QCARGA(ii)*1i);
            %la potencia del nudo en el que esta la carga y el
            generador será la calculada anteriormente mas la suma de
            la potencia activa y reactiva consumida en la carga.
        end
    end
end
end
%FIN DE FUNCION FLUJO DE POTENCIA

%FUNCION FLUJO POTENCIA LTC
function [LTCPQenviada,LTCPQrecibida]
=LTCFlujoPQ(NLTC,LTCinicio,LTCfinal,Rltc,Xltc,Tap,VM,VA)

%Con esta función se calculara la potencia activa y reactiva que fluye
por la línea del transformador LTC.
for ii=1:NLTC

    %Calculo de las admitancias en el LTC.
    denom=Rltc(ii)^2+Xltc(ii)^2;
    YRS=Rltc(ii)/denom;
    YIS=-Xltc(ii)/denom;
    YRM=-Rltc(ii)/denom;
    YIM=Xltc(ii)/denom;

    for jj=1:2
        A1=VA(LTCinicio(ii))-VA(LTCfinal(ii));

        %Calculo de las potencias del LTC

        ltcPCAL=VM(LTCinicio(ii))^2*YRS+Tap(ii)*VM(LTCinicio(ii))*VM(LTCfinal(ii))*
        (YRM*cos(A1)+YIM*sin(A1));
        ltcQCAL=-
        VM(LTCinicio(ii))^2*YIS+Tap(ii)*VM(LTCinicio(ii))*VM(LTCfinal(ii))*
        (YR*sin(A1)-YIM*cos(A1));

        if jj==1
            LTCPQenviada=ltcPCAL+1i*ltcQCAL;
        else

```

```
ltcPCAL=VM(LTCinicio(ii))^2*YRS+Tap(ii)*((VM(LTCinicio(ii)))/Tap(ii))*  
VM(LTCfinal(ii))*(YRM*cos(A1)+YIM*sin(A1));  
    ltcQCAL=-  
VM(LTCinicio(ii))^2*YIS+Tap(ii)*((VM(LTCinicio(ii)))/Tap(ii))*VM(LTCfi  
nal(ii))*(YRM*sin(A1)-YIM*cos(A1));  
    LTCPQrecibida=ltcPCAL+li*ltcQCAL;  
end  
  
    inicio=LTCinicio(ii);  
    LTCinicio(ii)=LTCfinal(ii);  
    LTCfinal(ii)=inicio;  
    VM(LTCinicio(ii))=VM(LTCinicio(ii))*Tap(ii);  
end  
end  
%FIN FUNCION LTC FLUJO PQ  
end  
%FIN FUNCION PROGRAMA PRINCIPAL
```

ANEXO III.

ALGORITMO EN MATLAB DE FLUJO DE POTENCIA CON TRANSFORMADOR PS

```
function
[nbb,tipobus,VM,VA,ngn,nudogen,PGEN,QGEN,QMAX,QMIN,ntl,tlinicio,...
tlfinal,tlresis,tlreact,tlcond,tlsuscept,nsh,shnudo,shresis,shreact,..
.
    nld,nudocarga,PCARGA,QCARGA,itmax,tol,nmax] =
DatosFlujoPotencia()

%Esta función sirve para leer los datos de los nudos del sistema.
%Convención utilizada para los cuatro posibles tipos de nudos.
    %tipobus=1 oscilante
    %tipobus=2 PV generador
    %tipobus=3 PQ de carga
    %tipobus=4 PQ de generador

%%DATOS DE LOS NUDOS%%

nbb=10; %numero de nudos. Se introducirá un nuevo nudo, el 10.
tipobus(1)=1; VM(1)=1.04; VA(1)=0; %el nudo 1 es tipo 1
%(oscilante)el modulo de la tensión en el nudo 1 es ese valor y su
argumento es cero grados.
tipobus(2)=2; VM(2)=1.025; VA(2)=0;
%Nudo 2 es de tipo PV.
tipobus(3)=2; VM(3)=1.025; VA(3)=0;
%Nudo 3 es de tipo PV.
tipobus(4)=3; VM(4)=1; VA(4)=0;
%El resto serán de tipo PQ y sus condiciones iniciales de modulo y
%argumento son las indicadas.
tipobus(5)=3; VM(5)=1; VA(5)=0;
tipobus(6)=3; VM(6)=1; VA(6)=0;
tipobus(7)=3; VM(7)=1; VA(7)=0;
tipobus(8)=3; VM(8)=1; VA(8)=0;
tipobus(9)=3; VM(9)=1; VA(9)=0;
tipobus(10)=4; VM(10)=1; VA(10)=0; %nuevo nudo introducido.
%Sera de tipo PQ generador.
%La potencia de ese nudo será la controlada.
```

```
%%DATOS DE LOS GENERADORES%%
```

```
ngn=3; %numero de generadores  
%nudogen= nudo en el que está el generador.  
%PGEN y QGEN= las potencias generadas.  
%QMAX Y QMIN= limites de reactiva en los generadores.  
nudogen(1)=1; PGEN(1)=0; QGEN(1)=0; QMAX(1)=5; QMIN(1)=-5;  
nudogen(2)=2; PGEN(2)=1.63; QGEN(2)=0; QMAX(2)=3; QMIN(2)=-3;  
nudogen(3)=3; PGEN(3)=0.85; QGEN(3)=0; QMAX(3)=3; QMIN(3)=-3;
```

```
%%DATOS DE LAS LINEAS DE TRANSMISION%%
```

```
ntl=9; %numero de lineas de transmisión  
%tlinicio=nudo procedencia de la línea  
%tlfinal=nudo final de la línea
```

```
%LINEA 1 (TRANSFORMADOR)
```

```
tlinicio(1)=1; %el nudo de inicio de la línea de transmisión 1 es el  
nudo 1  
tlfinal(1)=4; %el nudo del final de la línea de transmisión 1 es el  
nudo 4  
tlresis(1)=0; tlreact(1)=0.0576; %resistencia y reactancia de dicha  
línea  
tlcond(1)=0; %conductancia derivador línea 1.  
tlsuscept(1)=0; %susceptancia del derivador de la línea 1.
```

```
%LINEA 2 (del nudo 4 al 6)
```

```
tlinicio(2)=4; tlfinal(2)=6; tlresis(2)=0.017; tlreact(2)=0.092;  
tlcond(2)=0; tlsuscept(2)=0.079;
```

```
%LINEA 3 (del nudo 4 al 5)
```

```
tlinicio(3)=4; tlfinal(3)=5; tlresis(3)=0.01; tlreact(3)=0.085;  
tlcond(3)=0; tlsuscept(3)=0.088;
```

```
%LINEA 4 (del nudo 6 al 9)
```

```
tlinicio(4)=6; tlfinal(4)=9; tlresis(4)=0.039; tlreact(4)=0.17;  
tlcond(4)=0; tlsuscept(4)=0.179;
```

```
%LINEA 5 (del nudo 10 al 7)
```

```
%Esta línea pasa a ir del nudo 5 al 7 a del 10 al 7.  
%Ya que del nudo 5 al 10 se meterá la línea con el transformador  
evaluado en este algoritmo.  
tlinicio(5)=10; tlfinal(5)=7; tlresis(5)=0.032; tlreact(5)=0.161;  
tlcond(5)=0; tlsuscept(5)=0.153;
```

```
%LINEA 6 (TRANSFORMADOR)
```

```
tlinicio(6)=2; tlfinal(6)=7; tlresis(6)=0; tlreact(6)=0.0625;
```

```

tlcond(6)=0; tlsuscept(6)=0;

%LINEA 7 (del nudo 7 al 8)
tlinicio(7)=7; tlfinal(7)=8; tlresis(7)=0.0085; tlreact(7)=0.072;
tlcond(7)=0; tlsuscept(7)=0.0745;

%LINEA 8 (del nudo 9 al 8)
tlinicio(8)=9; tlfinal(8)=8; tlresis(8)=0.0119; tlreact(8)=0.1008;
tlcond(8)=0; tlsuscept(8)=0.1045;

%LINEA 9 (TRANSFORMADOR)
tlinicio(9)=3; tlfinal(9)=9; tlresis(9)=0; tlreact(9)=0.0586;
tlcond(9)=0; tlsuscept(9)=0;

%%DATOS DERIVADORES (SHUNT)%%
nsh=0; %numero de elementos derivadores
%shnudo = nudo en el que está el derivador
shnudo(1)=0; shresis(1)=0; shreact(1)=0;
%el nudo en el que esta es cero (no hay)
%resistencia elemento derivador 1 es cero
%reactancia del elemento derivador 1 es cero

%%DATOS DE LAS CARGAS DEL SISTEMA%%

nld=3; %numero de cargas en el sistema
%nudocarga= es el nudo en el que está situada la carga
nudocarga(1)=5; % la carga 1 está situada en el nudo 5
PCARGA(1)=1.25; QCARGA(1)=0.5; %potencias absorbidas por dicha carga.
nudocarga(2)=6; PCARGA(2)=0.9; QCARGA(2)=0.3;
nudocarga(3)=8; PCARGA(3)=1; QCARGA(3)=0.35;

%% PARAMETROS GENERALES%%
itmax=100; %el numero de iteraciones máximo posible para evitar bucle
infinito.
tol=1e-12; %tolerancia de la iteración para alcanzar la solución
nmax=2*nbb;
end

%FUNCION PARA LEER LOS DATOS DEL TRANSFORMADOR PS
function
[NPS, PSinicio, PSfinal, Rps, Xps, Tap, TapMax, TapMin, NudoControlado, psP, nma
x] = PSDatosFlujoPotencia(nmax)

    NPS=1; %Numero de transformadores PS en el sistema.
    PSinicio(1)=5; %El nudo de inicio de la línea con PS.
    PSfinal(1)=10; %El nudo de final de la línea con PS.
    Rps(1)=0; %La resistencia del transformador PS

```

```

Xps(1)=0.1; %La inductancia del transformador PS
Tap(1)=0; % El ángulo inicial del transformador de tomas
TapMax(1)=10*pi/180; %El límite máximo del ángulo. En radianes
TapMin(1)=-10*pi/180; %El límite mínimo del ángulo. En radianes
NudoControlado(1)=10; %El nudo controlado por el transformador PS
psP(1)=-0.6; % el objetivo de la potencia activa en el nudo
    controlado.
nmax=nmax+NPS; %Para el posterior uso
end

function [it,VM,VA,PQenviada,PQrecibida,PQperdidas,PQnudo,Tap] =
ProgramaPrincipal()

%%%%%%%%%          PROGRAMA PRINCIPAL          %%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%
%          Rocío Camacho Aylagas
%          TFG
%          Departamento de Ingeniería Eléctrica 2015.

%          FLUJO DE CARGAS CON TRANSFORMADOR PS

% (1) Lectura de datos del sistema: DatosFlujoPotencia
% (2) Lectura de datos del transformador PS:PSDatosFlujoPotencia
% (3) Función: Ybus
% (4) Función: PSNewtonRaphson
%     4.1 PotenciasNetas
%     4.2 PotenciasCalculadas
%     4.3 PSPotenciasCalculadas
%     4.4 LimiteGeneradores
%     4.5 PotenciasDesajuste
%     4.6 PSPotenciasDesajuste
%     4.7 Jacobiana
%     4.8 PSJacobiana
%     4.9 ActualizacionVariablesEstado
%     4.10 PSActualizaciones
%     4.11 PSLimites
%
% (5) Función: FlujoPQ
% (6)Función: PSFlujoPQ

clc;
clear all;

%lectura de datos del sistema.

```

```
[nbb,tipobus,VM,VA,ngn,nudogen,PGEN,QGEN,QMAX,QMIN,ntl,tlinicio,tlfinal, ...
tlresis,tlreact,tlcond,tlsuscept,nsh,shnudo,shresis,shreact,nld,nudocarga, ...
PCARGA,QCARGA,itmax,tol,nmax]=DatosFlujoPotencia();

%lectura de datos del transformador PS.
[NPS,PSinicio,PSfinal,Rps,Xps,Tap,TapMax,TapMin,NudoControlado,psP,nmax] = PSDatosFlujoPotencia(nmax);

[YR,YI]=YBus(tlinicio,tlfinal,tlresis,tlreact,tlsuscept,tlcond,shnudo,shresis,shreact,ntl,nbb,nsh);
%con esta función se calcula la matriz de admitancias

[VM,VA,it,Tap] =
PSNewtonRaphson(nmax,tol,itmax,ngn,nld,nbb,tipobus,nudogen,nudocarga,PGEN,QGEN,QMAX,QMIN,PCARGA,QCARGA,YR,YI,VM,VA,NPS,PSinicio,PSfinal,Rps,Xps,Tap,TapMax,TapMin,NudoControlado,psP);
%Devuelve los valores de los módulos y los desfases de las tensiones
%también el numero de iteraciones necesario para llegar a la convergencia.

[PQenviada,PQrecibida,PQperdidas,PQnudo] =
FlujoPQ(nbb,ngn,ntl,nld,nudogen,nudocarga,tlinicio,tlfinal,tlresis,tlreact,tlcond,tlsuscept,PCARGA,QCARGA,VM,VA);
%Devolverá los valores de los flujos de potencia en las líneas de transmisión.
[PQpsenviada,PQpsrecibida,PQpsperdidas]=PSFlujoPQ(VM,VA,NPS,PSinicio,PSfinal,Rps,Xps,Tap);
%Devolverá los valores de los flujos de potencia en la línea del transformador PS.

it %Muestra el numero de iteraciones necesarios para llegar a la convergencia
VM %Muestra el modulo de la tensión en cada nudo.
VA=VA*180/pi%Muestra el valor del ángulo de la tensión en grados.
PQenviada %Muestra la potencia enviada en cada línea.
PQrecibida %Muestra la potencia recibida en cada línea.
PQperdidas %Muestra las pérdidas de cada línea de transmisión.
Tap %Posición final de la toma del PS en radianes
Tapgrados= (Tap*360)/(2*pi) %posición de la toma del PS en grados.
PQpsenviada % potencias enviadas desde el inicio de la línea del PS.
PQpsrecibida %potencias recibidas en el final de la línea del PS.
PQpsperdidas %perdidas en la línea del PS.

BUCLE PARA CALCULO PERDIDAS TOTALES
PerdidasTotales=0;
```

```

for xx=1:ntl
    PerdidasTotales=PerdidasTotales+PQperdidas(xx);
end

PerdidasTotales
%Todos estos valores están en por unidad.

%%%%%%%%FIN DEL PROGRAMA PRINCIPAL %%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%CONSTRUCCION MATRIZ ADMITANCIAS
function[YR,YI]= YBus(
    tlinicio,tlfinal,tlresis,tlreact,tlsuscept,tlcond,shnudo,shresis,shrea
    ct,ntl,nbb,nsh)
YR=zeros(nbb,nbb);
YI=zeros(nbb,nbb);

%contribución de las líneas de transmisión.
for kk=1:ntl
    ii=tlinicio(kk);
    jj=tlfinal(kk);
    denom=tlresis(kk)^2+tlreact(kk)^2;
    YR(ii,ii)=YR(ii,ii)+tlresis(kk)/denom+tlcond(kk);
    YI(ii,ii)=YI(ii,ii)-tlreact(kk)/denom+tlsuscept(kk);
    YR(ii,jj)=YR(ii,jj)-tlresis(kk)/denom;
    YI(ii,jj)=YI(ii,jj)+tlreact(kk)/denom;
    YR(jj,ii)=YR(jj,ii)-tlresis(kk)/denom;
    YI(jj,ii)=YI(jj,ii)+tlreact(kk)/denom;
    YR(jj,jj)=YR(jj,jj)+tlresis(kk)/denom+tlcond(kk);
    YI(jj,jj)=YI(jj,jj)-tlreact(kk)/denom+tlsuscept(kk);
end

%contribución de los elementos desviadores
for kk=1:nsh
    ii=shnudo(kk);
    denom=shresis(kk)^2+shreact(kk)^2;
    YR(ii,ii)=YR(ii,ii)+shresis(kk)/denom;
    YI(ii,ii)=YI(ii,ii)-shreact(kk)/denom;
end
end

%FIN DE LA FUNCION YBUS

%FUNCION NEWTON RAPHSON DE PS:
function [VM,VA,it,Tap] =
    PSNewtonRaphson(nmax,tol,itmax,ngn,nld,nbb,tipobus,nudogen,nudocarga,P
    GEN,QGEN,QMAX,QMIN,PCARGA,QCARGA,YR,YI,VM,VA,NPS,PSinicio,PSfinal,Rps,
    Xps, Tap, TapMax, TapMin, NudoControlado,psP)

```



```
%Esta función llama a diversas funciones para llevar a cabo la
solución por medio de iteración.
%Devolverá el modulo de la tensión, el argumento de la tensión
%el numero de iteraciones necesarias para que la solución converja y
la posición de la toma del transformador regulador de la fase.

flag=0;
%indicador para salir del bucle si la solución converge.

it =1;
%contador del bucle para no superar el numero de iteraciones máximas
y no provocar un bucle infinito.

[PNETA,QNETA] =
PotenciasNetas(nbb,ngn,nld,nudogen,nudocarga,PGEN,QGEN,PCARGA,QCARGA);
%se llama a la función para que nos de las potencias netas activas y
%reactivas

while (it<itmax && flag==0)

    [PCAL,QCAL] = PotenciasCalculadas(nbb,VM,VA,YR,YI);
    %se llama la función para que calcule las potencias reactiva y
    activa en cada línea

    [PCAL,QCAL,psPCAL,psQCAL]=PSPotenciasCalculadas(VM,VA,PCAL,QCAL,
    PSinicio,PSfinal,NPS,Tap,Rps,Xps);
    %función que calcula las potencias calculadas por la línea del PS
    Y actualiza las potencias calculadas en los nudos.

    [QNETA,tipobus] =
    LimiteGeneradores(ngn,nudogen,tipobus,QGEN,QMAX,QMIN,QCAL,QNETA,QCARGA
    ,it,VM,nld,nudocarga);
    %Se comprueba que los limites de reactiva no se sobrepasen.

    [DPQ,DP,DQ,flag] =
    PotenciasDesajuste(nmax,nbb,tol,tipobus,flag,PNETA,QNETA,PCAL,QCAL);
    %Se hallan las potencias de desajuste y se comprueba que la
    solución converja, sino el bucle continua.

    [DPQ,flag]=PSPotenciasDesajuste(nbb,DPQ,flag,tol,NPS,PSinicio,PSfinal,
    NudoControlado,psP,psPCAL);
    %Actualización de la matriz de potencias desajuste con el PS.

    if flag==1
        break
    end
```

```

[JAC] = Jacobiana(nmax,nbb,tipobus,PCAL,QCAL,VM,VA,YR,YI);
%Calcula la matriz Jacobiana para poder actualizar las variables
    de estado.

[JAC]=PSJacobiana(nbb,VM,VA,JAC,NPS,PSinicio,PSfinal,Tap,NudoControlad
o,Rps,Xps,psPCAL,psQCAL);
%Actualización matriz Jacobiana con el transformador PS.

D=JAC\DPQ';
%calculo de la matriz D definida anteriormente

[VA,VM] = ActualizacionVariablesEstado(nbb,D,VA,VM);
% Esta última función actualiza las variables de estado y nos da
    un nuevo valor.

[Tap]=PSActualizaciones(nbb,D,NPS,Tap);
%Se actualiza el desfase del transformador regulador de fase.

[Tap,NudoControlado]=PSLimites(NPS,Tap,TapMax,TapMin,NudoControlado);
%Se comprueban los límites de la regulación de las fases.

% este bucle se repetirá hasta que la solución converja o hasta
    que el numero de iteraciones sea máximo.

it=it +1;
%sumamos 1 al contandor que en este caso son las iteraciones.
end
end
%FIN DE LA FUNCION NEWTON RAPHSON

%FUNCION PARA CALCULAR LAS POTENCIAS NETAS
function [PNETA,QNETA] =
PotenciasNetas(nbb,ngn,nld,nudogen,nudocarga,PGEN,QGEN,PCARGA,QCARGA)

%calculo de las potencias netas
PNETA=zeros(1,nbb); %Se crea una matriz de 1 fila y nbb columnas de
ceros
QNETA=zeros(1,nbb); %Igual para las potencias reactivas netas.

%lo siguiente es crear la matriz con valores. Lo haremos mediante un
bucle
for ii=1:ngn

    PNETA(nudogen(ii))=PNETA(nudogen(ii))+PGEN(ii);

```

```

    %se suma a cada termino de la matriz de ceros el valor de la
    potencia activa generada en dicho nudo
    QNETA(nudogen(ii))=QNETA(nudogen(ii))+QGEN(ii);
    %se Suma a cada termino cero, la potencia reactiva generada en los
    %nudos que tengan generación
end

for ii=1:nld
    PNETA(nudocarga(ii))=PNETA(nudocarga(ii))-PCARGA(ii);
    QNETA(nudocarga(ii))=QNETA(nudocarga(ii))-QCARGA(ii);
    %Se hace lo mismo que con los generadores pero para el caso de los
    %nudos que tengan carga.
end
end
%FIN DE LA FUNCION POTENCIAS NETAS

%FUNCION CALCULO POTENCIAS CALCULADAS:
function [PCAL,QCAL] = PotenciasCalculadas(nbb,VM,VA,YR,YI)

PCAL=zeros(1,nbb);%primero se crea una matriz de una fila y nbb
columns
QCAL=zeros(1,nbb);%lo mismo para las reactivas

for ii=1:nbb
    PSUM=0;
    QSUM=0;
    for jj=1:nbb
        PSUM=PSUM+VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*cos(VA(ii)-
VA(jj))+YI(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj)));
        QSUM=QSUM+VM(ii)*VM(jj)*(YR(ii,jj)*sin(VA(ii)-VA(jj))-
YI(ii,jj)*cos(VA(ii)-VA(jj)));
    end
    PCAL(ii)=PSUM;
    QCAL(ii)=QSUM;
end
end
%FIN DE LA FUNCION POTENCIAS CALCULADAS

%FUNCION PARA LAS POTENCIAS CALCULADAS POR LA RAMA DEL TRANSFORMADOR.
function[PCAL,QCAL,psPCAL,psQCAL]=PSPotenciasCalculadas(VM,VA,PCAL,QCA
L,PSinicio,PSfinal,NPS,Tap,Rps,Xps)

for ii=1:NPS
    %Contador desde 1 hasta el numero de trafos PS.
    %Calculo de las admitancias.
    denom=Rps(ii)^2+Xps(ii)^2;

```

```

YRps=Rps(ii)/denom;
YIps=-Xps(ii)/denom;

for nn=1:2
    kk=(ii-1)*2+nn;
    A1=VA(PSinicio(ii))-VA(PSfinal(ii))-Tap(ii);
    psPCAL(kk)=(VM(PSinicio(ii))^2)*YRps-
VM(PSinicio(ii))*VM(PSfinal(ii))*(YRps*cos(A1)+YIps*sin(A1));
    psQCAL(kk)=- (VM(PSinicio(ii))^2)*YIps-
VM(PSinicio(ii))*VM(PSfinal(ii))*(YRps*sin(A1)-YIps*cos(A1));

    %Actualización potencias calculadas:

    PCAL(PSinicio(ii))=PCAL(PSinicio(ii))+psPCAL(kk);
    QCAL(PSinicio(ii))=QCAL(PSinicio(ii))+psQCAL(kk);
    %Se guardan en las potencias calculadas anteriormente.

    inicio=PSinicio(ii);
    PSinicio(ii)=PSfinal(ii);
    PSfinal(ii)=inicio;
    Tap(ii)=-Tap(ii);
    %Se cambia el nudo de inicio y el de fin así como el
    signo de la toma.
end
end
end

%FIN DE LA FUNCION PS POTENCIAS CALCULADAS.

%FUNCION PARA REVISAR LIMITE GENERADORES
function [QNETA,tipobus] =
LimiteGeneradores(ngn,nudogen,tipobus,QGEN,QMAX,QMIN,QCAL,QNETA,QCARGA
,it,VM,nld,nudocarga)
%Esta función sirve para comprobar que los limites de reactiva de los
%generadores no son sobrepasados.

if it>2
    %si el numero de iteraciones es mayor de dos haremos la
    comprobación
    flag2=0;
    for ii=1:ngn
        %se pone el contador desde 1 hasta num generadores
        jj=nudogen(ii);
        %se asigna a jj el numero de nudo en el que está el generador
        if (tipobus(jj)==2)
            %si el tipo de nudo es 2, es decir PV generador
            if (QCAL(jj)>QMAX(ii))

```

```

        %y si la potencia reactiva calculada de ese nudo es
        mayor que el límite máximo
        QNETA(nudogen(ii))=QMAX(ii);
        %la potencia reactiva neta en ese nudo será la máxima
        %posible.
        tipobus(jj)=4;
        %el tipo de nudo cambiara a nudo PQ generador
        flag2=1;

elseif (QCAL(jj)<QMIN(ii))
    %si la potencia reactiva calculada es menor que el
    límite inferior posible.
    QNETA(nudogen(ii))=QMIN(ii);
    %se asigna el valor de la potencia mínima posible a la
    %potencia reactiva neta en ese nudo
    tipobus(jj)=4;
    %el tipo de nudo pasa a ser de tipo PQ generador.
    flag2=1;
end

if flag2==1
    % si re ha realizado la asignación de la potencia
    reactiva en el límite inferior o superior se hará lo
    siguiente:
    for kk=1:nld
        %el contador va de 1 a el numero de cargas
        if nudocarga(kk)==jj
            %si hay una carga en ese nudo PQ de
            generación la potencia reactiva neta se
            le restara la potencia reactiva absorbida
            por la carga
            QNETA(nudocarga(kk))=QNETA(nudocarga(kk))-
            QCARGA(kk);
        end
    end
end
end
end
end

end
end

%FIN DE LA FUNCION LIMITE GENERADORES

%FUNCION POTENCIAS DESAJUSTE;
function [DPQ,DP,DQ,flag] =
PotenciasDesajuste(nmax,nbb,tol,tipobus,flag,PNETA,QNETA,PCAL,QCAL)
%Sirve para calcular las potencias de desajuste

DPQ=zeros(1,nmax); %Ahora la matriz de desajuste tendrá un término mas

```

```

%al haber un transformador PS.
DP=zeros(1,nbb);
DQ=zeros(1,nbb);

DP=PNETA-PCAL; %La potencia activa de desajuste será la resta de la
potencia neta y la potencia calculada, halladas anteriormente.
DQ=QNETA-QCAL;%Igual para la potencia reactiva de desajuste

%A continuación se realiza un bucle para eliminar las contribuciones
de activa y reactiva en el nudo oscilante y, la reactiva de los nudos
PV.

for ii=1:nbb
    %contador desde el nudo 1 hasta nbb
    if (tipobus(ii)==1)
        % si el tipo de nudo es oscilante
        DP(ii)=0;
        %la potencia de desajuste activa en ese nudo será cero
        DQ(ii)=0;
        %la potencia reactiva de desajuste en ese nudo será cero.

    elseif (tipobus(ii)==2)
        %si se trata de un nudo PV generador, la potencia reactiva de
        %desajuste será cero
        DQ(ii)=0;
    end
end

%Ahora para reordenar las potencias de desajuste.
% es decir, para meterlas en la matriz DPQ que es el conjunto de
potencias activas y reactivas de desajuste en una sola matriz
kk=1;
for ii=1:nbb
    % contador desde 1 hasta el numero de nudos del sistema.
    DPQ(kk)=DP(ii);
    DPQ(kk+1)=DQ(ii);
    kk=kk+2;%contador para ir rellenoando la matriz DPQ
    %Nos queda una matriz de una fila y nmax+NPS columnas en la que
    los términos impares serán las potencias activas de desajuste y
    % los términos pares serán las potencias reactivas de desajuste
    %los terminos ultimso se rellenanar luego.
end

%comprobar si converge la solución.
for ii=1:2*nbb;
    % contador desde 1 hasta el numero de nudos por dos
    %para recorrer la matriz DPQ hallada anteriormente.
    if (abs(DPQ)<tol)

```

```

        %si el valor absoluto de todos los valores de dicha matriz es
        menor que la tolerancia definida anteriormente
        flag=1;
        %asignamos este indicador para salirnos del bucle de iteración
        de la función de Newton Raphson.
    end
end
end
%FIN FUNCION POTENCIAS DESAJUSTE

%FUNCION ACTUALIZACION POTENCIAS DESAJUSTE CON PS
function [DPQ, flag]=PSPotenciasDesajuste(nbb, DPQ, flag, tol, NPS, PSinicio,
PSfinal, NudoControlado, psP, psPCAL)
    ll=1;
    for ii=1:NPS

        if (PSinicio(ii)==NudoControlado(ii))
            %si el nudo de inicio de la línea es el nudo que se
            %controla
            DPQ(ii+2*nbb)=psP(ii)+psPCAL(ll);%%%%
            %El termino 2nmax+NPS será la potencia que queremos
            que fluya menos la que realmente fluye.
        elseif (PSfinal(ii)==NudoControlado(ii))
            %si el nudo controlado es el del final.
            DPQ(ii+2*nbb)=psP(ii)+psPCAL(ll+1);
            %Igual pero con la potencia calculada en el nudo del
            final.
        end

        if (NudoControlado(ii)==0)
            % si no se controla ningún nudo.
            % esto pasa cuando las tomas se salen de los limites.
            DPQ(ii+2*nbb)=0;
        end
        ll=ll+2;

    end
    %Prueba de convergencia

    if (flag==1)
        %si antes las potencias de desajuste nos han dado menores
        que la tolerancia, se comprueba que el termino 2Nmax+NPS
        también sea menor que la tolerancia

        for ll=2*nbb+1:2*nbb+NPS

            if (abs(DPQ)<tol)

```

- 159 -


```

        if ii==jj
            JAC(ii,ii)=1;
        else
            JAC(ii,jj)=0;
            JAC(jj,ii)=0;
        end
    end
end
end
if (tipobus(kk)==1) || (tipobus(kk)==2)

    ii=kk*2;
    for jj=1:2*nbb
        if ii==jj
            JAC(ii,ii)=1;
        else

            JAC(ii,jj)=0;
            JAC(jj,ii)=0;
        end
    end
end
end
end
%FIN DE LA CONSTRUCCION DE LA MATRIZ JACOBIANA

%FUNCION MATRIZ JACOBIANA ACTUALIZACION CON PS.
function[JAC]=PSJacobiana(nbb,VM,VA,JAC,NPS,PSinicio,PSfinal,Tap,NudoC
ontrolado,Rps,Xps,psPCAL,psQCAL)

    for ii=1:NPS
        %Contador desde 1 hasta el numero de trafos PS.
        pp=2*nbb+ii;

        %Calculo de las admitancias del PS
        denom=Rps(ii)^2+Xps(ii)^2;
        YR=Rps(ii)/denom;
        YI=-Xps/denom;

        %calculo de entradas jacobianas del trafo PS:
        for kk1=1:2

            kk=2*PSinicio(ii)-1;
            mm=2*PSfinal(ii)-1;
            nn=(ii-1)*2+kk1;

            JKK(1,1)=-(VM(PSinicio(ii))^2)*YI;
            JKK(1,2)=(VM(PSinicio(ii))^2)*YR;

```

```
JKK(2,1)=- (VM(PSinicio(ii))^2)*YR;
JKK(2,2)=- (VM(PSinicio(ii))^2)*YI;

JKM(1,1)=psQCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YI;
JKM(1,2)=psPCAL(nn)-(VM(PSinicio(ii))^2)*YR;
JKM(2,1)=-psPCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YR;
JKM(2,2)=psQCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YI;

%Actualización en la Jacobiana:

JAC(kk:kk+1, kk:kk+1)=JAC(kk:kk+1, kk:kk+1)+JKK;
JAC(kk:kk+1, mm:mm+1)=JAC(kk:kk+1, mm:mm+1)+JKM;

inicio=PSinicio(ii);
PSinicio(ii)=PSfinal(ii);
PSfinal(ii)=inicio;

end

%ahora se añaden los términos nuevos del transformador PS:

kk=2*PSinicio(ii)-1;
mm=2*PSfinal(ii)-1;
nn=(ii-1)*2+1;

%A continuación los términos de la potencia activa y
reactiva nuevos. (ultimas filas y columnas)
JKE(1)=psQCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YI;
JKE(2)=-psPCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YR;

JEK(1)=-psQCAL(nn)-(VM(PSinicio(ii))^2)*YI;
JEK(2)=psPCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YR;

JME(1)=-psQCAL(nn+1)-(VM(PSfinal(ii))^2)*YI;
JME(2)=psPCAL(nn+1)-(VM(PSfinal(ii))^2)*YR;
JEM(1)=psQCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YI;
JEM(2)=psPCAL(nn)-(VM(PSinicio(ii))^2)*YR;

JE(1)=psQCAL(nn)+(VM(PSinicio(ii))^2)*YI;

if (NudoControlado(ii)~=0)

    JAC(kk:kk+1, pp)=JAC(kk:kk+1, pp)+JKE';
    JAC(mm:mm+1, pp)=JAC(mm:mm+1, pp)+JME';
    JAC(pp, kk:kk+1)=JAC(pp, kk:kk+1)+JEK;
    JAC(pp, mm:mm+1)=JAC(pp, mm:mm+1)+JEM;
```

```

JAC (pp,pp)=JAC (pp,pp)+JE (1);

else
    %Si no hay ningún nudo controlado:
    JAC (1:pp,pp)=zeros;
    JAC (pp,1:pp)=zeros;
    JAC (pp,pp)=1;
end
end
end

%FUNCION DE ACTUALIZACION DE VARIABLES DE ESTADO
function [VA,VM] = ActualizacionVariablesEstado (nbb,D,VA,VM)
%En esta ultima función actualizamos las variables de estado.
%Estas son los módulos y argumentos de las tensiones.
iii=1;
for ii=1:nbb
    VA(ii)=VA(ii)+D(iii);
    VM(ii)=VM(ii)+D(iii+1)*VM(ii);
    iii=iii+2;
end
end

%FIN DE LA FUNCION DE ACTUALIZACION DE LAS VARIABLES DE ESTADO

%FUNCION ACTUALIZACION TRANSFORMADOR PS
function [Tap]=PSActualizaciones (nbb,D,NPS, Tap)

    for ii =1:NPS
        Tap(ii)=Tap(ii)+D(nbb*2+ii);
        %El ultimo termino de la matriz D hallada será la
        %variación de la toma (fase) del transformador PS.
    end
end

%FIN FUNCION ACTUALIZACION DE TOMAS

%FUNCION REVISION LIMITES PS:
function [Tap,NudoControlado]=PSLimites (NPS, Tap, TapMax, TapMin, NudoContr
olado)

    for ii=1:NPS
        %Contador desde 1 hasta el numero de trafo PS.
        if (NudoControlado(ii)~=0)
            %Si hay algún nudo controlado
            if (Tap(ii)>TapMax(ii))
                % y si la toma ha superado su valor máximo.
                Tap(ii)=TapMax(ii);
                % se le asigna su valor máximo
            end
        end
    end
end

```

```

        NudoControlado(ii)=0;
        %y el nudo controlado pasa a ser ninguno.

    elseif (Tap(ii)<TapMin(ii))
        %Lo mismo para el límite inferior de la toma.
        Tap(ii)=TapMin(ii);
        NudoControlado(ii)=0;
    end
end
end
end
end

%FIN FUNCION LIMITES PS

%FUNCION CALCULO FLUJO DE POTENCIA
function [PQenviada,PQrecibida,PQperdidas,PQnudo] =
FlujoPQ(nbb,ngn,ntl,nld,nudogen,nudocarga,tlinicio,tlfinal,tlresis,tlr
eact,tlcond,tlsuscept,PCARGA,QCARGA,VM,VA)

%El objetivo de esta función es conocer la potencia enviada y recibida
en cada nudo por cada línea, además de las perdidas en cada línea de
transmisión.

PQenviada=zeros(1,ntl);
%Se crea una matriz de una fila y ntl columnas
PQrecibida=zeros(1,ntl);
%Otra matriz de una fila y ntl columnas
PQperdidas=zeros(1,ntl);

%Bucle para calcular la potencia activa y reactiva en el inicio y
final de cada línea de transmisión.

for ii=1:ntl
    %contador de la línea 1 a ntl

    Vinicio=(VM(tlinicio(ii))*cos(VA(tlinicio(ii)))+VM(tlinicio(ii))*sin(V
A(tlinicio(ii)))*1i);
    %Ya que tenemos los valores del modulo y argumento en cada nudo,
    Se llamara inicio ya que será
    %considerada la tensión en el inicio de la línea.

    Vfinal=(VM(tlfinal(ii))*cos(VA(tlfinal(ii)))+VM(tlfinal(ii))*sin(VA(tl
final(ii)))*1i);
    %Lo mismo que en la expresión anterior, pero en este caso será
    para el nudo de final de la línea que se esté tratando.

    tlimped=tlresis(ii)+tlreact(ii)*1i;
    % se calcula la impedancia de la línea en forma compleja.

```

```

    corriente=(Vinicio-
Vfinal)/tlimped+Vinicio*(tlcond(ii)+tlsuscept(ii)*1i);
    %Se calcula la corriente en la línea tratada que sale del nudo de
    %inicio
    PQenviada(ii)=Vinicio*conj(corriente);
    %con la corriente calculada que fluye desde el inicio
    %se calcula la potencia enviada desde el inicio.
    %Esta será el producto de la tensión en el inicio
    %por el conjugado de la corriente.
    %Se considera POTENCIA COMPLEJA (S)

    corriente=(Vfinal-
Vinicio)/tlimped+Vfinal*(tlcond(ii)+tlsuscept(ii)*1i);
    %Ahora sustituimos el valor anterior de la corriente por esta
    %expresión, que calcula la corriente desde el final
    PQrecibida(ii)=Vfinal*conj(corriente);
    %Entonces la potencia recibida será la corriente desde el final
    %conjugada multiplicada por la tensión en el final

    PQperdidas(ii)=PQenviada(ii)+PQrecibida(ii);
    %Las perdidas en cada línea serán la suma de las pérdidas enviadas
    %y las recibidas.
end

%Calculo de inyección de potencia activa y reactiva en cada nudo.
PQnudo=zeros(1,nbb);
for ii=1:ntl
    %Bucle con contador desde 1 hasta el numero de lineas de
    %transmisión del sistema.
    PQnudo(tlinicio(ii))=PQnudo(tlinicio(ii))+PQenviada(ii);
    PQnudo(tlfinal(ii))=PQnudo(tlfinal(ii))+PQrecibida(ii);
end

%correcciones en los nudos de generación, donde hay cargas, para
%conseguir contribuciones correctas de los generadores
for ii=1:nld
    %contador desde 1 hasta el numero de cargas del sistema
    jj=nudocarga(ii);
    %Igualamos a jj el nudo en el que esta la carga.
    for kk=1:ngn
        %contador desde 1 hasta el numero de generadores.
        ll=nudogen(kk);
        %Igualamos a ll el nudo en el que está el generador.
        if jj==ll
            %si coincide el nudo de generador con el nudo de la carga
            PQnudo(jj)=PQnudo(jj)+(PCARGA(ii)+QCARGA(ii)*1i);
        end
    end
end

```

```

        %la potencia del nudo en el que esta la carga y el
        generador será la calculada anteriormente mas la suma de
        la potencia activa y reactiva consumida en la carga.
    end
end
end
end
end
%FIN DE LA FUNCION DE FLUJO DE POTENCIAS

%FUNCION FLUJO POTENCIAS LINEA DEL PS:
function[PQpsenviada,PQpsrecibida,PQpsperdidas]=PSFlujoPQ(VM,VA,NPS,PS
inicio,PSfinal,Rps,Xps,Tap)
%se crean las matrices a rellenar.
PQpsenviada=zeros(1,NPS);
PQpsrecibida=zeros(1,NPS);
PQpsperdidas=zeros(1,NPS);

%cálculos de potencia activa y reactiva al inicio y final de la línea.
for ii=1:NPS

    %tensión el inicio de la línea considerada.
    Vinicio=(VM(PSinicio(ii))*cos(VA(PSinicio(ii)))+VM(PSinicio(ii))*sin(V
A(PSinicio(ii)))*1i);
    %tension en el final de la línea considerada.
    Vfinal=(VM(PSfinal(ii))*cos(VA(PSfinal(ii)))+VM(PSfinal(ii))*sin(VA(PS
final(ii)))*1i);

    %impedancia de la línea
    impedancia=(Rps(ii)+Xps(ii)*1i);
    %admitancia de la línea.
    admitanciamutua=-(cos(Tap(ii))+sin(Tap(ii))*1i)/impedancia;
    %corriente que circula desde el inicio al final de la línea.
    corriente=Vinicio/impedancia+Vfinal*admitanciamutua;
    %potencia enviada desde el inicio al final de la línea
    PQpsenviada(ii)=Vinicio*conj(corriente)
    %admitancia mutua pero en sentido contrario
    admitanciamutua=-(cos(Tap(ii))-sin(Tap(ii))*1i)/impedancia;
    %corriente desde el final hasta el principio de la línea
    corriente=Vinicio*admitanciamutua+Vfinal/impedancia;
    %La potencia transmitida desde el final de la línea
    PQpsrecibida(ii)=Vfinal*conj(corriente);
    %operación para calculo de perdidas.
    PQpsperdidas(ii)=PQpsenviada(ii)+PQpsrecibida(ii);
end
end
%FIN DE LA FUNCION PS FLUJO DE POTENCIAS.

```

ANEXO IV. ALGORITMO PARA LA REPRESENTACION DE LAS CURVAS PV O DE NARIZ

```
clc;
clear all;

%BUCLE PARA LAS GRAFICA PV %%
%En este caso se trata del codigo para el nudo 5%

%INDUCTIVO= POSITIVO
%CAPACITIVO= NEGATIVO
%EJEMPLO: fdp=0.97 capacitivo:
%fdp1=-0.97

%FACTORES DE POTENCIA A REPRESENTAR%
fdp1=input('Ingrese el primer factor de potencia: ');
fdp2=input('Ingrese el segundo factor de potencia: ');
fdp3=input('Ingrese el tercer factor de potencia: ');
fdp4=input('Ingrese el cuarto factor de potencia: ');
fdp5=input('Ingrese el quinto factor de potencia: ');

%Ángulos en radianes
phi1=acos(fdp1);
phi2=acos(fdp2);
phi3=acos(fdp3);
phi4=acos(fdp4);
phi5=acos(fdp5);

PCARGAvariable=0; %inicialmente
ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a
representar.

while PCARGAvariable<10

    %PRIMER FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi1);%potencia reactiva
    absorbida por la carga dependiente del factor de potencia del primer
    fdp

    [it,VM,VA] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
    %programa para el cálculo de los módulos de las tensiones
```

```
if it==100 %Si la solución no converge, el resultado no es válido.
    %Ya no será un sistema estable.
    %El método Newton Raphson no representa esos puntos.
    break
end

vectorP1(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de las potencias activas
vectorV1(ii)=VM(5);%Vector de los módulos de las tensiones del
primer fdp. Si se quiere representar la curva PV de otro nudo que no
sea 5, se cambia el índice de VM.

PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.01;%Termino para ir aumentando la
potencia activa absorbida
ii=ii+1;
%se suma 1 al contador ii

end

PCARGAvariable=0;
ii=1;%contador para ir rellorando los vectores que se van a graficar.

while PCARGAvariable<10

    %SEGUNDO FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi2);%potencia reactiva
    absorbida por la carga dependiente del factor de potencia del segundo
    fdp

    [it,VM,VA] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
    %programa para el cálculo de los módulos de las tensiones

    if it==100 %Si la solución no converge, el resultado no es
    válido.
        %Ya no será un sistema estable.
        %El método Newton Raphson no representa esos puntos.
        break
    end

    vectorP2(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
    valores de las potencias activas
    vectorV2(ii)=VM(5);%Vector de los módulos de las tensiones del
    segundo fdp

    PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.01;%Termino para ir aumentando la
    potencia activa absorbida
```



```
    ii=ii+1;

end

PCARGAvariable=0;
ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar.

while PCARGAvariable<10

    %TERCER FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi3);%potencia reactiva
    absorbida por la carga dependiente del factor de potencia del tercer
    fdp

    [it,VM,VA] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
    %programa para el cálculo de los módulos de las tensiones

    If it==100 %Si la solucion no converge, el resultado no es
    válido.
        %Ya no será un sistema estable.
        %El método Newton Raphson no representa esos puntos.
        break
    end

    vectorP3(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
    valores de las potencias activas
    vectorV3(ii)=VM(5);%Vector de los módulos de las tensiones del
    tercer fdp

    PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.01;%Termino para ir aumentando la
    potencia activa absorbida
    ii=ii+1;

end

PCARGAvariable=0;
ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar.

while PCARGAvariable<10

    %CUARTO FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi4);%potencia reactiva
    absorbida por la carga dependiente del factor de potencia del cuarto
    fdp

    [it,VM,VA] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
```

```
%programa para el cálculo de los módulos de las tensiones

    if it==100 %Si la solución no converge, el resultado no es
válido.
        %Ya no será un sistema estable.
        %El método Newton Raphson no representa esos puntos.
        break
    end

    vectorP4(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de las potencias activas
    vectorV4(ii)=VM(5);%Vector de los módulos de las tensiones del
cuarto fdp

    PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.01;%Termino para ir aumentando la
potencia activa absorbida
    ii=ii+1;
end

PCARGAvariable=0;
ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar

while PCARGAvariable<10

    %QUINTO FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi5);%potencia reactiva
absorbida por la carga dependiente del factor de potencia del quinto
fdp

    [it,VM,VA] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
    %programa para el cálculo de los módulos de las tensiones

    if it==100 %Si la solución no converge, el resultado no es
válido.
        %Ya no será un sistema estable.
        %El método Newton Raphson no representa esos puntos.
        break
    end

    vectorP5(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de las potencias activas
    vectorV5(ii)=VM(5);%Vector de los módulos de las tensiones del
quinto fdp
```

```

        PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.01;%Termino para ir aumentando la
potencia
        %activa absorbida
        ii=ii+1;

        %se suma 1 al contador ii
end
%GRAFICA Y PROPIEDADES

figure; grid;
hold on
p1=plot(vectorP1,vectorV1,'r');
p2=plot(vectorP2,vectorV2,'c');
p3=plot(vectorP3,vectorV3,'g');
p4=plot(vectorP4,vectorV4,'b');
p5=plot(vectorP5,vectorV5,'y');

xlabel('Potencia Activa (pu)')
ylabel('Tension (pu)')
legend ('fdp=1','fdp=0.98i','fdp=0.95i','fdp=0.98c','fdp=0.95c' )

set(p1,'linewidth',2);
set(p2,'linewidth',2);
set(p3,'linewidth',2);
set(p4,'linewidth',2);
set(p5,'linewidth',2);

set(t,'fontsize',16);

MODIFICACION DatosFlujoPotencia.

nudocarga(1)=5; % la carga 1 esta situada en el nudo 5

PCARGA(1)=PCARGAvariable; QCARGA(1)=QCARGAvariable; %potencias
absorbidas por dicha carga.

```

ANEXO V. ALGORITMO PARA LA REPRESENTACIÓN DE LA TOMA VS POTENCIA ACTIVA.

```
clc;
clear all;

%BUCLE PARA LA GRAFICA Toma VS P.activa %
%TRANSFORMADOR DE TOMAS VARIABLES REGULA LA TENSION EN EL NUDO 5 EN 1
POR
%UNIDAD.

%INDUCTIVO= POSITIVO
%CAPACITIVO=NEGATIVO

%EJEMPLO: fdp=0.97 capacitivo:
%fdp1=-0.97

%FACTORES DE POTENCIA A REPRESENTAR%
fdp1=input('Ingrese el primer factor de potencia: ');
fdp2=input('Ingrese el segundo factor de potencia: ');
fdp3=input('Ingrese el tercer factor de potencia: ');
fdp4=input('Ingrese el cuarto factor de potencia: ');
fdp5=input('Ingrese el quinto factor de potencia: ');

%Angulos en radianes
phi1=acos(fdp1);
phi2=acos(fdp2);
phi3=acos(fdp3);
phi4=acos(fdp4);
phi5=acos(fdp5);

PCARGAvariable=0; %inicialmente
ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar.

while PCARGAvariable<10

    %PRIMER FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi1);%potencia reactiva
    absorbida por
    %la carga dependiente del factor de potencia del primer fdp

    [it,VM,VA,Tap] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
    %programa para el calculo de la toma del transformador

    if it==100 %Si la solucion no converge, el resultado no es valido.
        %Ya no sera un sistema estable.
        %El metodo Newton Raphson no representa esos puntos.
        break
    end
end
```

```
    vectorP1(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de
    %las potencias activas
    vectorT1(ii)=Tap;%Vector de las tomas del primer fdp

    PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.1;%Termino para ir aumentando la
potencia
    %activa absorbida
    ii=ii+1;
    %se suma 1 al contador ii

end

PCARGAvariable=0;
ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar.

while PCARGAvariable<10

    %SEGUNDO FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi2);%potencia reactiva
absorbida por
    %la carga dependiente del factor de potencia del segundo fdp

    [it,VM,VA,Tap] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
    %programa para el calculo de la toma del transformador regulador

    if it==100 %Si la solucion no converge, el resultado no es
valido.
        %Ya no sera un sistema estable.
        %El metodo Newton Raphson no representa esos puntos.
        break
    end

    vectorP2(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de
    %las potencias activas
    vectorT2(ii)=Tap;%Vector de las tomas del segundo fdp

    PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.1;%Termino para ir aumentando la
potencia
    %activa absorbida
    ii=ii+1;

end

PCARGAvariable=0;
ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar.

while PCARGAvariable<10

    %TERCER FDP INTRODUCIDO
    QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi3);%potencia reactiva
absorbida por
    %la carga dependiente del factor de potencia del tercer fdp

    [it,VM,VA,Tap] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
    %programa para el calculo de la toma del LTC
```

```
        if it==100 %Si la solucion no converge, el resultado no es
valido.
            %Ya no sera un sistema estable.
            %El metodo Newton Raphson no representa esos puntos.
            break
        end

        vectorP3(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de
        %las potencias activas
        vectorT3(ii)=Tap;%Vector de la toma del transformador LTC del
tercer fdp

        PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.1;%Termino para ir aumentando la
potencia
        %activa absorbida
        ii=ii+1;

    end

    PCARGAvariable=0;
    ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar.

    while PCARGAvariable<10
        %CUARTO FDP INTRODUCIDO
        QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi4);%potencia reactiva
absorbida por
        %la carga dependiente del factor de potencia del cuarto fdp

        [it,VM,VA,Tap] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
        %programa para el calculo de la toma del transformador LTC.

        if it==100 %Si la solucion no converge, el resultado no es
valido.
            %Ya no sera un sistema estable.
            %El metodo Newton Raphson no representa esos puntos.
            break
        end

        vectorP4(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de
        %las potencias activas
        vectorT4(ii)=Tap;%Vector de las tomas del trafo del cuarto fdp

        PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.1;%Termino para ir aumentando la
potencia
        %activa absorbida
        ii=ii+1;
    end

    PCARGAvariable=0;
    ii=1;%contador para ir rellenando los vectores que se van a graficar

    while PCARGAvariable<10
```

```
%QUINTO FDP INTRODUCIDO
QCARGAvariable=PCARGAvariable*tan(phi5);%potencia reactiva
absorbida por
%la carga dependiente del factor de potencia del quinto fdp

[it,VM,VA,Tap] = ProgramaPrincipal(PCARGAvariable,QCARGAvariable);
%programa para el calculo de la toma del transformador regulador

if it==100 %Si la solucion no converge, el resultado no es valido.
    %Ya no sera un sistema estable.
    %El metodo Newton Raphson no representa esos puntos.
    break
end

vectorP5(ii)=PCARGAvariable;%vector en el que se guardan los
valores de
%las potencias activas
vectorT5(ii)=Tap;%Vector de las tomas del quinto fdp

PCARGAvariable=PCARGAvariable+0.1;%Termino para ir aumentando la
potencia
%activa absorbida
ii=ii+1;

%se suma 1 al contador ii
end

%GRAFICA Y PROPIEDADES

figure; grid;
hold on
p1=plot(vectorP1,vectorT1,'r');
p2=plot(vectorP2,vectorT2,'c');
p3=plot(vectorP3,vectorT3,'g');
p4=plot(vectorP4,vectorT4,'b');
p5=plot(vectorP5,vectorT5,'y');

xlabel('Potencia Activa (pu)')
ylabel('Posicion de la Toma')
legend('fdp=1','fdp=0.98i','fdp=0.95i','fdp=0.98c','fdp=0.95c' )

set(p1,'linewidth',2.5);
set(p2,'linewidth',2.5);
set(p3,'linewidth',2.5);
set(p4,'linewidth',2.5);
set(p5,'linewidth',2.5);
```